

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN
DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN CON ACEITE VEGETAL EN REDES
ELÉCTRICAS SITUADAS EN CLIMAS CÁLIDOS.

MARIO ANDRES MEJÍA TABOADA



UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA

MAESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES

BARRANQUILLA

2020

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN
DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN CON ACEITE VEGETAL EN REDES
ELÉCTRICAS SITUADAS EN CLIMAS CÁLIDOS.

MARIO ANDRES MEJÍA TABOADA

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de Magíster en Eficiencia
Energética y Energías Renovables

TUTORES DEL PROYECTO:

MSc. JORGE IVAN SILVA ORTEGA

MSc. JOSÉ RICARDO NUÑEZ ALVAREZ

UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA

MAESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES

BARRANQUILLA

2020

Dedicatoria

Este trabajo de grado está dedicado especialmente a mi esposa Luisa Varela y a mi hija Abigail Mejía, por el amor, la paciencia y su incansable compañía frente a todas las adversidades. Son ellas quienes me han dado la fuerza y la motivación necesaria para avanzar y conseguir juntos este nuevo logro.

A mis padres Noreiva y Mario, quienes me han respaldado de manera incondicional e incansable. A mis hermanas Andrea y María que han llenado mi vida con tanto amor y motivación para seguir soñando y cosechando triunfos. A mis abuelos Alcira y Cesar, quienes con mucha paciencia y amor me han inculcado muchos de los valores que hoy intento reflejar a los demás.

Mario Andrés Mejía Taboada

Agradecimientos

En primer lugar, agradecerle a Dios por permitirme alcanzar este logro tan importante que consolida todos los esfuerzos y la dedicación puestos sobre esta investigación, dándome la satisfacción y la posibilidad de seguir creciendo profesionalmente.

También quiero agradecerles a mis colegas, amigos y tutores de tesis de maestría; a Jorge Silva y José Núñez, por la dedicación y el apoyo brindado a lo largo de este trabajo, por el respeto y la aceptación de las ideas planteadas durante toda la investigación, por la dedicación y sus constantes indicaciones. Gracias por la confianza brindada desde el primer momento en que me abrieron las puertas en el Departamento de Energía.

Asimismo deseo agradecerle a la Universidad de la Costa y al Departamento de Energía por la oportunidad de seguir creciendo personal y profesionalmente. A la empresa Electricaribe S.A. E.S.P., en especial al Ingeniero Nivaldo Rosales por la oportunidad de trabajar a su lado y permitirme desarrollar esta importante investigación.

A mi familia, amigos y colegas que siempre me brindaron un apoyo moral, fraternal, ayudándome a resistir en todos los momentos difíciles.

Resumen

Los nuevos requisitos para una mejor política energética sostenible en todo el mundo son fáciles de observar, principalmente porque se desarrollan muchos proyectos de energía sostenible en los que la academia trabaja en conjunto con las autoridades y las empresas comerciales tales como las de servicios públicos. Las empresas del sector energético, especialmente las del sector eléctrico, buscan mediante la implementación de nuevas tecnologías y estrategias reducir el impacto que estas generan sobre el medio ambiente debido a las grandes superficies que abarcan. Uno de los principales activos son los transformadores de distribución local. Estos equipos, en su mayoría, utilizan aceite mineral medio aislante y refrigerante generando un impacto negativo sobre el entorno debido a sus propiedades químicas. Por esta razón, una de las soluciones sugeridas es reemplazar el aceite mineral por fluidos a base de ésteres naturales, conocidos también como aceites vegetales, pues proporcionan mejores propiedades técnicas y medioambientales, en comparación con los aceites minerales, convirtiéndolo en un sustituto confiable. Los ésteres naturales se basan en tecnologías limpias con el propósito de garantizar el adecuado comportamiento y funcionamiento de los equipos de transformación. El objetivo principal de esta investigación es presentar un análisis técnico-económico obtenido de cinco años de aplicaciones sobre transformadores sumergidos en aceite que usan fluidos de éster natural en Colombia. La metodología examina cuarenta y cuatro transformadores de distribución sumergidos en aceite; la mitad usa aceite mineral, y la otra mitad usa éster natural, operando bajo el mismo régimen de carga. Los resultados evidenciaron la factibilidad de implementar esta tecnología porque los costos son muy similares y la reducción de riesgos e impacto ambiental es considerable.

Palabras clave: Técnico-económica, transformadores, redes eléctricas, climas cálidos

Abstract

New requirements for a better sustainable energy policy around the world are easy to observe, many projects in sustainable energy are developed wherein the academia works together the authorities and commercial firms such as electrical grid utilities. Companies in the energy sector, mainly those in the electricity sector, are working on the implementation of new technologies and strategies to reduce their impact on the environment due to the large areas they cover. One of the main assets are local distribution transformers, these equipment use insulating and refrigerant medium mineral oil, these oils have a negative impact on the environment due to their chemical properties, for this reason one of the suggested solutions is to replace mineral oil by fluids based on natural esters, also known as vegetable oils, which provide better technical and environmental properties compared to mineral oils, making it a safe substitute for mineral oil. Natural esters are based on clean technologies in order to guarantee the proper behavior and operation of transformation equipment. The main goal of the present paper is to present a technical-economic analysis obtained from five years of applications of oil-immersed transformers using natural ester fluids in Colombia. The methodology considers forty-four oil-immersed distribution Transformers, a half use mineral oil and the other side use natural ester, operating under the same load regime. Results evidenced the feasibility of implementing this technology because the costs are very similar, and the reduction of risks and environmental impact is considerable.

Keywords: Technical-economic, transformers, electrical networks, hot climates

Contenido

Lista de tablas y figuras	10
Introducción.	12
Planteamiento del Problema	17
Justificación	18
Objetivos	20
Objetivo General.	20
Objetivos Específicos.....	20
Alcance	21
Aspectos Metodológicos.....	22
Capítulo I.	24
Tendencias del uso de aceites de origen vegetal como medio aislante y refrigerante.	24
Estado del Arte.....	24
Evolución Histórica del Aceite Vegetal como Medio Aislante y Refrigerante.	25
Producción y Uso del Aceite Vegetal como Dieléctrico.	34
Selección del fluido base	34
Estabilización del aceite.....	35
Estructura molecular del éster natural.....	36
Casos de Éxito con Aceites Vegetales en Transformadores Eléctricos.	37
Capítulo II.	38
Aceites dieléctricos para transformadores	38

Propiedades de los aceites dieléctricos.	39
Propiedades eléctricas.	39
Tensión de ruptura	39
Formación de gases.....	40
Fallas de gases desprendidos por fallos eléctricos simulados.....	40
Propiedades Físicas	43
Viscosidad.....	43
Punto de fluidez	43
Inflamabilidad: Punto de inflamación y Punto de combustión.....	44
Temperatura de operación.....	44
Propiedades Químicas.....	45
Absorción de agua.....	45
Estabilidad a la oxidación.	46
Propiedades medio ambientales	47
Comparación entre los diferentes tipos de aceites	47
Comparación del rendimiento entre el aceite vegetal y el aceite mineral.....	48
Biodegradabilidad del Aceite Dieléctrico	48
Estabilidad a la oxidación	49
Punto de inflamación y combustión.....	49
Viscosidad.....	50
Formación de gases.....	51
Rigidez Dieléctrica.....	53
Capítulo III.....	54

Resultados de la investigación.	54
Aspectos Para el Diseño de Transformadores de Distribución.....	54
Análisis Técnico-Económico para Transformadores de Distribución con Aceite Vegetal.	55
Conclusiones	69
Trabajos Futuros	71
Referencias.....	72
Anexos	84

Lista de tablas y figuras

Tablas

Tabla 1 Descripción de los beneficios térmicos, ambientales y técnicos de los aceites vegetales..	14
Tabla 2 Datos típicos para diferentes tipos de aceite.....	19
Tabla 3. Propiedades y Tipos de Semillas Oleaginosas (Fofana, 2013).....	35
Tabla 4. Detalle de equipos instalados en la Región Caribe.....	37
Tabla 5. Resultados DGA prueba de formación de arcos (Martin et al., 2006b).....	41
Tabla 6. Resultados DGA prueba de descargas parciales (Martin et al., 2006b).	42
Tabla 7.Datos típicos para los diferentes fluidos (Yves Bertrand & Lauzevis, 2013).....	47
Tabla 8. Capacidad nominal de los transformadores instalados en la Región Caribe Colombiana (Hernandez-Herrera et al., 2019).	56
Tabla 9. Resultados de la IRT aplicada a transformadores con aceite mineral y aceite vegetal. .	57
Tabla 10. Costos asociados a la adquisición de equipos de transformación llenados con aceite mineral vs transformadores llenados con aceite vegetal en Colombia.	60
Tabla 11. Reporte de Incidencias en Transformadores de Distribución con Base a la Resolución CREG 015 de 2018.	61
Tabla 12. Proyección Regional de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia - Revisión Abril 2019, Demanda UCP Anual – UCP de Barranquilla	64
Tabla 13. VPN de costos de inversión, AOM y BRANE.	65
Tabla 14. VPN Beneficios asociados al proyecto.	66
Tabla 15. Evaluación Económica Transformadores de Distribución con Aceite Vegetal y Aceite Mineral.....	66

Figuras

Figura 1. Tipos de semillas oleaginosas utilizadas para la producción de aceite vegetal (T V Oommen, 1995).	24
Figura 2. Estructura molecular de un triglicérido de origen natural (Mcshane, 1976b).	37
Figura 3. Diseño de un transformador tipo utilizando para las pruebas piloto.	38
Figura 4. Tensión de ruptura en aceites vegetales y aceites minerales (A. R. Marulanda et al., 2008).	40
Figura 5. Saturación de agua del aceite mineral y el aceite vegetal (Committee et al., 2008).	45
Figura 6. Comparación de los porcentajes de biodegradación (CIGRE working group A2-35, 2010; T V Oommen, 1995).	49
Figura 7. Desempeño de los diferentes fluidos con respecto al riesgo de incendios (Y. Bertrand & Hoang, 2003b).....	50
Figura 8. Viscosidad de diferentes aceites a diferentes condiciones de envejecimiento (Divakaran, 2012).	51
Figura 9. Porcentaje de gases producidos por dos aceites vegetales (T V Oommen, 1995).	52
Figura 10. Porcentaje de producción de gases en aceites vegetales y minerales (B.C. Ким, 2008).	53
Figura 11. Imagen termográfica (IRT) tomada a uno de los transformadores con aceite vegetal instalados.....	59
Figura 12. Comparación térmica de los transformadores de distribución instalados.	59
Figura 13. Flujo de caja de un proyecto con transformadores inmersos en aceite vegetal y un proyecto de transformadores inmersos en aceite mineral.	67

Introducción.

A través de los años, el aceite derivado del petróleo (aceite mineral) ha sido el elemento más utilizado como medio aislante y refrigerante en los transformadores eléctricos inmersos en aceite (Fernando-Navas, Cadavid-Ramírez, & Echeverry-Ibarra, 2012). El aceite dieléctrico utilizado en los transformadores ayuda a reducir el calor generado durante la operación del equipo además de aislar eléctricamente aquellos elementos que se encuentran energizados al interior del equipo de transformación (brettis, 2017). Sin embargo, en 1976, estos aceites minerales fueron considerados peligrosos y tóxicos para la salud humana debido a la presencia de bifenilos policlorados PCB (Asano & Page, 2014). Eso condujo al desarrollo de nuevos proyectos: las mejoras de los transformadores de tipo seco para aplicaciones en interiores y el desarrollo del proyecto para reemplazar los aceites con base de PCB por líquidos sin PCB, como ésteres sintéticos y siliconas con hidrocarburos de alta temperatura o de alto peso molecular (HMWHs). No obstante, no se consideran biodegradables porque pueden causar un riesgo ambiental en caso de derrame (Ciuriuc, Vihacencu, Dumitran, & Notingher, 2012; Milanés et al., 2020). Estas restricciones legales llevaron a las empresas a trabajar en el desarrollo de nuevos productos como líquidos dieléctricos hacia políticas de producción más limpias (Sagastume Gutiérrez et al., 2018; Barrio et al., 2018; Ochoa et al., 2019; Barrozo et al., 2020); pues, además de cumplir con sus propiedades químicas, físicas y eléctricas, deben ser no tóxicos, biodegradables, reciclables y no peligrosos (Ghani et al., 2018; Valencia et al., 2019).

Estas propiedades permitieron el uso de productos no derivados del petróleo con propiedades no tóxicas durante su uso como derivados de recursos renovables. Es el caso de los aceites vegetales derivados de productos agrícolas naturales obtenidos de semillas de girasol, colza / semilla de colza, semillas de soja, entre otros. Estos ésteres son completamente biodegradables

(95% - 100%) y no tóxicos debido a sus componentes y aditivos naturales (CIGRE working group A2-35, 2010). También fueron certificados por agencias ambientales como la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 1998). Incluso, se considera como "El líquido aislante menos inflamable" y están clasificados por la IEC con un alto nivel de punto de inflamación, superior a 300 ° C (Bashi, Abdullahi, Yunus, & Nordin, 2006; Discussion et al., 2009; Li, Zhang, Grzybowski, & Liu, 2012), y su punto de combustión en el rango de 340 ° - 360 ° C (Bashi et al., 2006; Murphy, Member, & Graham, 2009).

La aplicación y su uso comenzaron a principios de la década de 1990, basados en procesos de investigación y desarrollo como resultado de regulaciones ambientales y búsqueda de una operación de seguridad (Mcshane, 1976^a; Valencia et al., 2019; Marriaga-Márquez et al., 2020). En 1997, se instalaron varios transformadores sumergidos en aceite vegetal en empresas de servicios públicos y sitios industriales en los Estados Unidos. Proyectos similares se han desarrollado en América Latina con tecnologías montadas en plataformas virtuales (Fernando-Navas et al., 2012; Rebolledo Lozano, 2014; Nuñez et al., 2019; Palomino et al., 2020). En Colombia, la empresa de servicios eléctricos de la Región Caribe instaló en el año 2015 veintidós transformadores de distribución de energía que funcionaban con aceite vegetal en el rango de potencia desde 37.5 kVA, 50 kVA y 75 kVA, tal como se muestra en el Anexo 1 del presente documento. La Tabla 1 describe los beneficios del uso de aceites vegetales en transformadores de distribución.

Tabla 1.

Descripción de los beneficios térmicos, ambientales y técnicos de los aceites vegetales

No	Tipos de Beneficios	Aspectos Relevantes del Uso de Aceites Vegetales	Referencias
1	Térmicas	Menor riesgo de inflamación durante la operación. Ciertas marcas comerciales de éster natural están listadas como fluidos resistentes al fuego por Factory Mutual Global (FM) y Underwriters Laboratories (UL) para su uso en cumplimiento de los requisitos establecidos por el Código Eléctrico Nacional (NEC) y las normas de seguridad de la industria.	(Mcshane, 2001)(Y Bertrand & Hoang, 2004)
2		Un punto de inflamación más alto: en las normas ASTM D 6871 e IEC 62770, se establece una temperatura aceptable de 300 ° C o más	(ASTM, 2016b)
3		Un punto de ignición más alto, en las normas ASTM D 6871 e IEC 62770, se establece una temperatura aceptable de 275 ° C o más.	(ASTM, 2003)
4		FM, UL® y NEC® han considerado varias marcas registradas de fluidos de éster natural como líquidos aislantes menos inflamables (> 300 ° C).	(Mcshane, 1976a), (Arief, Ahmad, Lau, & Oil, 2014; Cargill, 2013;

No	Tipos de Beneficios	Aspectos Relevantes del Uso de Aceites Vegetales	Referencias
			GlobalTox International Consultants, 1999).
5		Fácilmente biodegradable y sin bioacumulativo (95-100%), superior al nivel estándar recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA.	(ASTM, 2003)
6	Ambientales	Cero toxicidad: se ha demostrado que no es tóxico debido a su origen natural, contiene aditivos comestibles, clasificándolo como no tóxico.	(Aluyor, Obahiagbon, & Ori-jesu, 2009; Fofana, 2013)
7		Reciclable y ajustable a diferentes aplicaciones finales	(brettis, 2017).
8		Sin PCB: no contiene bifenilos policlorados (PCB) y tampoco los genera debido a su origen natural.	(Y Bertrand & Hoang, 2004; Pierre Boss, Sc, & The, 2000; Rebolledo Lozano, 2014)
9	Técnicas	Mayor vida útil del equipo: los ésteres naturales extienden la vida útil del transformador debido a sus propiedades térmicas.	(Y Bertrand & Hoang, 2004; Herrera,

No	Tipos de Beneficios	Aspectos Relevantes del Uso de Aceites Vegetales	Referencias
10		Instalaciones más seguras: permiten la reducción de los niveles de riesgo en interiores y garantizan operaciones de condiciones seguras.	Chamorro, & Martín, 2015) (Arief et al., 2014; Cargill, 2013; Núñez et. al., 2020; GlobalTox International Consultants, 1999)

(Hernandez-Herrera, Silva-Ortega, Mejia-Taboada, Diaz Jacome, & Torregroza-Rosas, 2019).

Este documento describe los beneficios económicos, técnicos y ambientales del uso de transformadores de distribución que operan con éster natural en Colombia, enfatizando que su aplicación alrededor del mundo tiene un amplio uso y aceptación durante las últimas dos décadas. Adicionalmente, se muestra el uso de productos derivados como los ésteres etílicos producto de los aceites vegetales (Villardí, Leal, De Andrade, Pessoa, & Salgado, 2017). También las tendencias en investigación demuestran que se están trabajando en el proceso de hidroxigenación de los aceites vegetales (Chistyakov et al., 2017), y se realiza una comparación técnica y normativa del aceite evidenciando las características operativas y su impacto positivo en el medio ambiente.

Planteamiento del Problema

En la actualidad los transformadores eléctricos de distribución son unos de los equipos más utilizados en los sistemas eléctricos de potencia gracias a su gran aplicabilidad y practicidad a la hora de implementarlos en los sistemas de distribución de energía (Delgado, Fernandez, Ortiz, Renedo, Ortiz, et al., 2015). La mayoría de estos equipos de transformación se implementan en instalaciones de exteriores y por tal motivo la tecnología adaptada por estos equipos, para su refrigeración y aislamiento eléctrico interno, es el uso de aceite mineral como líquido dieléctrico (Rebolledo Lozano, 2014).

La implementación de este tipo de aceites en los transformadores eléctricos de distribución trae consigo diferentes complicaciones que han sido detectadas a través de los años y el continuo uso de esta tecnología.

Los principales problemas que fueron identificados están dados por (CIGRE working group A2-35, 2010; Ciuriuc et al., 2012; Martin, Khan, Dai, & Wang, 2006a; T V Oommen, Claiborne, Walsh, & Nc, 1998):

- Derrames inesperados por fallas de equipos.
- Bajo nivel de biodegradación.
- Alto nivel de toxicidad.
- Bajo nivel de inflamación.
- Desatención de la demanda por fallas de equipos debido a incrementos de temperatura interna.

Partiendo de la premisa de buscar una alternativa sustentable de bajo riesgo ambiental y con un potencial técnico significativo frente a las tecnologías convencionales, y tomando como referente las investigaciones previas, se pudo demostrar que el aceite vegetal podría ser

considerado como una alternativa a la tecnología actual gracias a sus propiedades medioambientales y propiedades técnicas (T. V. Oommen, Claiborne, Walsh, & Baker, 2000).

Teniendo en cuenta lo anterior, es importante resaltar que el operador de red de la región se encuentra interesado en aumentar y masificar la tecnología de transformadores de distribución que utilizan como medio aislante y refrigerante el aceite vegetal para cumplir con los objetivos y políticas medio ambientales propuestas al interior de esta organización. Por lo anterior, surge el siguiente interrogante:

¿Cómo se puede evaluar la factibilidad técnico-económica del uso de aceite vegetal en los transformadores de distribución cumpliendo los requerimientos técnicos y alcanzando una adecuada relación beneficio/costo?

Justificación

El aceite vegetal es uno de los líquidos de enfriamiento y aislamiento más seguros porque cuenta con un punto de combustión de aproximadamente 350 °C y un punto de inflamación de aproximadamente 330 ° C (Asano & Page, 2014). Este aceite dieléctrico está clasificado como uno de los "fluidos aislantes eléctricos menos inflamables". La Comisión Electrotécnica Internacional, mejor conocida por sus siglas en inglés "IEC", clasifica el equipo que usa este tipo de aceite como dieléctrico con la letra "K" en lugar de la letra tradicional "O" utilizada para los aceites minerales (la letra describe el código de enfriamiento de aceite) (IEC, 2009, 2011).

Para determinar que un elemento es ambientalmente seguro se utilizan dos criterios básicos: baja toxicidad y biodegradabilidad. La formulación final del aceite vegetal se sometió a pruebas de biodegradabilidad y podría clasificarse en las categorías de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, conocida también como "EPA" por sus siglas en inglés, como "biodegradable a largo plazo" y "fácilmente biodegradable" (EPA, 1998). Además, cuando se

aplicó una prueba de toxicidad acuática aguda (Related, The, Of, Of, & Chemicals, 2003), la formulación inicial del éster no pasó las pruebas, con una tasa de mortalidad del 100% en 24 horas. Se determinó que la causa de esta alta tasa de mortalidad estaba relacionada con el inhibidor de la oxidación a pesar de ser clasificado a manera de comestible (Mogozine, 2000). Finalmente, y después de diferentes pruebas, algunos investigadores encontraron un inhibidor de la oxidación igualmente efectivo y con las mismas cualidades eléctricas y biodegradables (Patrick McShane, Corkran, Rapp, & Luksich, 2006). Para esta nueva formulación los resultados fueron cero mortalidad durante el período de prueba estándar de 96 horas a 1000 mg / kg (GlobalTox International Consultants, 1999).

En la Tabla 2 se presentan los datos típicos para los diferentes tipos de aceites analizados:

Tabla 2.

Datos típicos para diferentes tipos de aceite

Propiedades		Aceite Vegetal	Aceite Sintético	Aceite Mineral
Viscosidad Cinemática ($mm^2.s^{-1}$)	a 0°C	200	350	55
	a 40°C	40	30	10
	a 100°C	9	5	3
Punto de congelamiento		-15	-60	-55
Punto de ignición (°C) Cubierta cerrada		290	270	140
Punto de flameo (°C) Cubierta abierta		330	310	180
Tensión de cortocircuito (kV)		55	60	65
Factor de disipación dieléctrica ($\tan \delta$) a 90°C		0.02	0.02	0.0001
Permeabilidad relativa a 90°C		3.0	3.2	2.2
Densidad a 20°C ($kg.m^{-3}$)		930	970	890
Valor de acidez/Neutralización ($mgKOH.g^{-1}$)		0.05	0.02	0.01

Propiedades	Aceite	Aceite	Aceite
	Vegetal	Sintético	Mineral
Saturación de agua ($mg.kg^{-1}$)	≈ 2.000	≈ 1.500	≈ 50
Conductividad térmica at $20^{\circ}C$ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	0.17	0.16	0.14
Calor específico at $20^{\circ}C$ ($kJ.kg^{-1}.K^{-1}$)	1.9	1.95	1.9
Coefficiente de expansión ($10^{-3}.K^{-1}$)	0.7	0.74	0.75
Biodegradabilidad después de 28 días (%)	> 90 Fácilmente	-	< 40 Lenta

(Yves Bertrand & Lauzevis, 2013).

Objetivos

Objetivo General.

Evaluar la factibilidad técnico-económica de la implementación de transformadores de distribución que utilizan aceite vegetal como medio aislante y refrigerante en zonas de clima cálido.

Objetivos Específicos.

- Desarrollar una revisión de las tecnologías de transformadores que implementan aceite vegetal como dieléctrico para su implementación en las redes de distribución eléctrica.
- Analizar la viabilidad técnica de la implementación de los transformadores con aceites vegetales en las redes eléctricas de distribución en zonas de clima cálido.
- Analizar la viabilidad económica de la implementación de los transformadores con aceites vegetales en las redes eléctricas de distribución en zonas de clima cálido.

Alcance

- **Ambiental**

Las tecnologías de alta eficiencia con bajo impacto ambiental permiten reducir los inconvenientes asociados a derrames de aceites con alto contenido de agentes tóxicos y bajos porcentajes de biodegradación ya que, este tipo de equipo puede ser instalado a la intemperie, cerca de cuerpos de agua y en zonas con alta concentración vegetal. Además, pueden ser instalados en los postes del tendido eléctrico a lo largo de calles y carreteras, en barrios residenciales y cerca de viviendas, exponiendo, no solo los seres vivos que habitan en su entorno, sino también a los moradores del sector residencial ante un posible derrame de aceite.

- **Productividad y Competitividad**

Por estos días las empresas son cada vez más conscientes del impacto ambiental producido por los gases contaminantes. Por tal razón, las empresas encaminan paulatinamente sus esfuerzos al uso de tecnologías con un alto grado de eficiencia y un bajo impacto ambiental, apostando a ser reconocidas por su contribución con el medio ambiente, incrementando así su competitividad y productividad en el mercado.

- **Económico**

La importancia de implementar, adquirir o utilizar equipos que contribuyan a la reducción del impacto ambiental, bien sea por el bajo consumo energético o bajo impacto sobre el medio ambiente, o la combinación de ambas, posibilita a las empresas, de los sectores públicos y privados, obtener beneficios económicos como la exoneración en pagos impositivos respecto a la adquisición de dichos equipos, así como otras exenciones tributarias relacionadas con el uso de esta tecnología.

- **Científico – Tecnológico**

Comprobar, a nivel técnico y operativo, aquellos parámetros resultantes de validaciones desarrolladas en otras investigaciones, que serán descritas más adelante en el presente documento. Lo anterior abre una ventana para corroborar si las nuevas tecnologías y herramientas, objetos de estudio, permiten la inclusión o definitivamente la eliminación de dicha idea para su comercialización y uso convencional. El objeto de este proyecto intenta determinar la viabilidad a nivel técnico y económico de la implementación de los aceites vegetales como medio aislante y refrigerante en transformadores de distribución para zonas de clima cálido.

Aspectos Metodológicos

Se aplicó una metodología descriptiva y aplicada, analizando la viabilidad técnica y económica de instalar transformadores de distribución que utilizan aceite vegetal en lugar de aceite mineral como medio dieléctrico y refrigerante. Para esto fueron considerados dos factores: el primero está asociado a los costos por adquisición e instalación de los equipos en los cuales incurrió la empresa Electricaribe S.A. E.S.P. para iniciar con la prueba Piloto en la Región Caribe colombiana, con el propósito de validar el comportamiento térmico del aceite. La validación del comportamiento térmico del aceite fue el segundo factor en consideración por su carácter fundamental en el análisis de la vida útil del transformador y el cumplimiento de sus requisitos técnicos para demostrar la existencia de un beneficio respecto a todas las partes interesadas en el mercado energético (fabricantes-empresas de energía-consumidores). Finalmente, esta investigación fue desarrollada en cuatro etapas.

- **Etapas 1.** Llevar a cabo una revisión del Estado del Arte de las tecnologías asociadas a los aceites vegetales utilizados como dieléctrico en equipos eléctricos de transformación, y realizar un estudio de los componentes internos de los transformadores y los productos

disponibles en el mercado a nivel nacional e internacional. Para esto fue necesario una investigación bibliográfica en bases de datos de consulta especializada IEEE, Web of Science, Scopus, entre otras, en las que se hallara información relacionada con aplicación de transformadores eléctricos de distribución que operaran con aceite vegetal. Asimismo, fue necesario conocer y analizar la información normativa y/o legislación que promueve o incentiva el uso de las fuentes renovables y equipos de alta eficiencia y con un bajo impacto en el medio ambiente.

Como resultado de la búsqueda y organización de información se procede a elaborar y/o construir el marco referencial o documento de revisión del estado del arte.

- **Etapa 2.** Identificar los parámetros técnicos asociados a los transformadores eléctricos que posibilitaban hacer una comparación entre las tecnologías convencionales y la propuesta de la presente investigación, con el fin de precisar la aceptación técnica de los transformadores que usan aceite vegetal como líquido aislante y refrigerante.

Para esto se implementaron diversos estudios termográficos en función de diagnosticar la factibilidad técnica del equipo. Del mismo modo, se identificaron los tipos de aceites existentes y sus componentes para la elaboración de una tabla taxonómica que permita identificar todos los agentes asociados a esta nueva tecnología.

Por otro lado, se buscaba determinar la factibilidad económica partiendo de la identificación de los costos asociados a la adquisición, operación y mantenimiento de estos equipos en comparación con los que utilizaban los aceites convencionales, así como los beneficios tributarios asociados a la adquisición de este tipo de tecnologías determinados por el retorno de la inversión de las empresas operadoras de red y usuarios finales.

- **Etapas 3.** Recopilar la información obtenida durante la ejecución del proyecto con el fin de elaborar el informe final de factibilidad técnico-económica, teniendo en cuenta los referentes investigativos y normativos asociados a esta innovación tecnológica y su posible impacto en el entorno.

Capítulo I.

Tendencias del uso de aceites de origen vegetal como medio aislante y refrigerante.

Estado del Arte.

Para este tipo de tecnología los aceites vegetales pueden ser extraídos de semillas oleaginosas (Girasol, Canola, Colza, Haba de Soja entre otros) (T V Oommen et al., 1998). Comúnmente los aceites contienen triglicéridos sintetizados de forma natural por esterificación del tri-alcohol glicerol con tres ácidos grasos (Edf, France, Lauzevis, & France, 2013). Estos ácidos están compuestos de cadenas de hidrocarburos lineales terminadas por una función carboxílica (Y. Bertrand & Hoang, 2003a). Estas moléculas tienen un número par de átomos de carbono (típicamente de 8 a 22 en triglicéridos) y la cadena puede estar saturada o principalmente mono-, di- o tri-insaturada (Edf et al., 2013; T V Oommen, 1995). En la Figura 1 se presentan los tipos de semillas típicas utilizadas para extraer aceite vegetal.

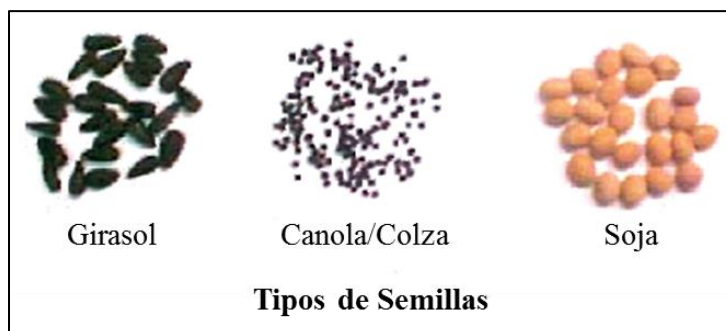


Figura 1. Tipos de semillas oleaginosas utilizadas para la producción de aceite vegetal (T V Oommen, 1995).

Evolución Histórica del Aceite Vegetal como Medio Aislante y Refrigerante.

En el año 1892 se realizaron las primeras pruebas en transformadores con aceite vegetal extraídos de semillas. Sin embargo, esta prueba no mostró ninguna mejora operativa en comparación con el aceite mineral y perdió el interés del mercado. El problema inicial de este aceite era su alto punto de fluidez y alta oxidación en comparación con el aceite mineral (Wilson, 1980).

En 1984 se produjeron los primeros transformadores con ésteres sintéticos que tenían buena lubricidad, bajo punto de fluidez y alto punto de inflamación. Además, fue sorprendente por su diseño compacto y dimensiones. No obstante este tenía menos aceptación en el mercado debido a su alto costo en comparación con otros líquidos dieléctricos (T. V. Oommen et al., 2000).

En el año 1991, la investigación comenzó a llevar a cabo una revisión del uso de aceites vegetales para su implementación en procesadores debido a las regulaciones ambientales y los riesgos de responsabilidad asociados con los aceites no comestibles, concluyendo así que estos aceites brindaban excelentes propiedades dieléctricas y de seguridad contra incendios, además de ser biodegradables gracias a su composición orgánica y, lo que es más importante, son más económicos y accesibles que los ésteres sintéticos (Bashi et al., 2006).

Entre 1998 y 2000, T. V. Oommen, C. C. Claiborne y E. J. Walsh realizaron pruebas de laboratorio y de vida útil en un aceite desarrollado a partir de fuentes vegetales con un alto contenido de oleico en un transformador eléctrico. Este mostró una alta biodegradabilidad, altos puntos de combustión e ignición, buena estabilidad a la oxidación y resistencia durante las pruebas de vida. También determinaron que implementar este aceite en transformadores de potencia requería cambios en el diseño relacionados con las propiedades de transferencia de calor y la fluidez del aceite debido a su alta viscosidad. Se realizaron una serie de pruebas de

calificación, incluidas las pruebas de aceptación habituales para aceites de transformador ordinarios y las pruebas de estabilidad a la oxidación se llevaron a cabo de acuerdo con lo establecido en normas ASTM (T. V. Oommen et al., 2000; T V Oommen et al., 1998; 5,949,017, 1999).

La descomposición térmica y eléctrica también se estudió. El estudio térmico se realizó con y sin aire en el ambiente dando como resultado que el fluido era 97-98% biodegradable. Los productos de descomposición bajo tensión eléctrica y térmica fueron similares a los del aceite mineral; no obstante, la producción de CO y CO₂ fue mayor en los aceites vegetales. Esta fue una investigación exploratoria para determinar el efecto del líquido sobre el rendimiento del transformador. La prueba expuso que el fluido biodegradable podría usarse como una alternativa factible. Finalmente se hicieron pruebas para los transformadores de distribución y este nuevo fluido comenzó a ser comercializado, demostrando el cumplimiento de los requisitos técnicos y medioambientales de los equipos de transformación.

Ante una posible disminución de las reservas de petróleo, en estos momentos se cuenta con un avance significativo en la investigación e implementación de estos ésteres. Otro mercado potencial para el aceite vegetal serían los condensadores, cables, interruptores y cambiadores de tomas en los que actualmente se usan aceites minerales y ésteres sintéticos (T. V. Oommen et al., 2000),(P Boss, Sa, Oommen, & T, 1999).

En el año 2002, Hemmer, Badent y Leibfried determinaron que el aceite de colza (RAPSOL T) tenía una alta estabilidad a la oxidación. El aceite de colza fue clasificado como "No contaminante para el agua", según la ley alemana (WHG). Otra investigación concluyó que las propiedades eléctricas del aceite vegetal son tan buenas como las del aceite mineral (A. R. Marulanda, Artigas, Gavidia, Labarca, & Paz, 2008). En 2003, algunas investigaciones

mostraron que RAPSOL T, un aceite de colza, tenía una buena compatibilidad con los transformadores convencionales ya utilizados; sin embargo, la tensión de ruptura de CA fue considerablemente alta. Por otro lado, el envejecimiento acelerado del papel aislante no influyó en las pérdidas dieléctricas en comparación con las pérdidas en el aceite mineral y el deterioro del papel en sí (Hemmer, Badent, & Leibfried, 2003).

Bertrand y Hoang, en el año 2004, presentaron un producto aislante líquido y refrigerante de plantas cultivadas de manera convencional que se puede utilizar en transformadores de distribución, ya que proporcionaban un excelente equilibrio entre alto rendimiento y bajo impacto ambiental frente a fugas o derrames. Los resultados, como en todas las otras pruebas, se compararon con los del aceite mineral y los valores de los ésteres se posicionaron mejor, proporcionando mayores beneficios específicamente en la resistencia a la descomposición del aire y las propiedades térmicas; (coeficiente de expansión térmica y calor específico) fueron igual de buenos (Y Bertrand & Hoang, 2004).

McShane realizó estudios sobre el envejecimiento del aislamiento del transformador Kraft en ésteres naturales, encontrando que su vida útil se extendió de 5 a 8 veces en comparación con el aceite mineral (McShane, Rapp, Corkran, Gauger, & Luksich, 2002).

Luego, en el año 2006, IL Hosier estudió el envejecimiento térmico del aceite vegetal, utilizando diversas técnicas analíticas, concluyendo que el aceite vegetal se vuelve más amarillo en comparación con el aceite mineral y el aceite de dodecibenceno envejecido (Ferguson, Lobeiras, Sabau, & Background, 2002; Hosierl, Vaughan, Sutton, & Davis, 2005). El proceso de envejecimiento se acelera cuando los aceites están en contacto con cobre. No obstante, los aceites vegetales no generaron partículas residuales en comparación con el aceite mineral y las

pérdidas dieléctricas por envejecimiento aumentaron como se esperaba (US 6,340,658 B1, 2002; Hosier, Vaughan, & Montjen, 2006; Kanno, Oota, Suzuki, & Ishii, 2001).

En el año 2008, Kanoh T. desarrolló un nuevo aceite vegetal dieléctrico llamado Éster de Ácido Graso de Palma (PFAE). Este aceite presentó una constante dieléctrica 1.3 veces mayor y una viscosidad 0.6 menor a la de otros aceites vegetales, cumpliendo con todas las características de seguridad y biodegradabilidad (Kanoh et al., 2008). Suwarno investigó los efectos de la temperatura sobre las propiedades dieléctricas de los aceites de ricino y el éster metílico, deduciendo que estos aceites refinados también tienen propiedades eléctricas excepcionales y son compatibles con las normas IEC (Ilyas & Sample, 2008).

Entretanto, Marulanda realizó pruebas a transformadores con aceite vegetal y analizó las propiedades y características de diferentes aceites. Los resultados indicaron que la vida útil de un transformador con aceite vegetal fue 42.86% mayor que la vida útil de un transformador con aceite mineral. La prueba también arrojó que el aceite vegetal mejora el rendimiento de los transformadores (R. Marulanda, Artigas, Gavidia, Labarca, & Paz, 2008). Rui-jin Liao también estableció que la tasa de degradación del papel podría reducirse y prolongarse su vida útil utilizando aceite BIOTEMP® (Rui-jin Liao, Xiang, Yang, & Tang, 2008). Dos años después, junto a Lijun Yang, Liao realizó la misma prueba bajo la metodología de envejecimiento térmico acelerado, lo que demuestra que la vida útil del papel Kraft se puede aumentar mediante el uso de aceite vegetal (Yang, Liao, Sun, Yin, & Zhu, 2010).

En el año 2009, Essam A. Al-Ammar y Mohammed I. Qureshi llevaron a cabo investigaciones con tres tipos de aceites (maíz, canola y oleína de palma), comparando la tensión de ruptura o la resistencia dieléctrica de los ésteres naturales, concluyendo que estos aceites exhibían una mayor tensión de ruptura en comparación con el aceite mineral. Finalmente los

resultados obtenidos se compararon con los valores establecidos en la norma IEC para aceites dieléctricos de origen mineral (Al-ammam & Qureshi, 2009).

En el año 2010, Jeong, estudió los efectos del envejecimiento acelerado de los aceites minerales y vegetales en los transformadores. Sobre la base de los resultados se concluyó que el aceite vegetal posee mejores características de aislamiento (Jeong, An, & Huh, 2012).

En el año 2011, Hans Gasser probó el envejecimiento del "Pressboard" en diferentes líquidos aislantes y descubrió que la tasa inicial de envejecimiento era similar para los aceites minerales y aceites vegetales. En los aceites vegetales se observó reacción con el agua después de cierto tiempo de envejecimiento -dependiendo de la condición de envejecimiento -y posteriormente el envejecimiento del Pressboard en aceites vegetales se redujo significativamente. A temperaturas altas y alto contenido de humedad, los aceites vegetales producen hidrólisis del agua (Gasser, Krause, Lashbrook, & Martin, 2011).

En el año 2012, Divakaran y Kalaivanan realizaron investigaciones sobre otras características eléctricas y térmicas de los aceites vírgenes y envejecidos demostrando que tienen un mejor rendimiento. Los aceites de coco y palma tienen mejor resistencia dieléctrica, viscosidad, puntos de inflamación y combustión más seguros, así como propiedades de pulso de mayor tensión que los aceites convencionales (Divakaran, 2012). Pei Guo analizó y concluyó que a la frecuencia industrial (59 Hz) la permitividad relativa disminuye con el aumento de la temperatura, y la permitividad (ϵ) del aceite vegetal y el papel aislante era tan alta como la del aceite mineral, lo que tiene un impacto significativo en el diseño del equipo (reduciendo el tamaño del transformador). El aumento del factor de disipación ($\tan \delta$) para ambos tipos de aceites y sus papeles aislantes y la tasa de aumento del factor de disipación fue mayor en el

aceite vegetal, demostrando que este tipo de aceite puede retrasar el envejecimiento del papel (Guo, Liao, Hao, Ma, & Yang, 2012).

Para el mismo año, Jinhua Han introdujo un nuevo tipo de transformador con alta resistencia al fuego, pero esta vez con aceite de camelia que fue sometido a pruebas eléctricas, físicas y químicas. Los resultados mostraron que el aceite de camelia tiene buenas propiedades eléctricas y alta resistencia al fuego y se consideró como un buen sustituto del aceite mineral. Las pérdidas del transformador bajo carga fueron del 3% y del 30% en el vacío, resultados que se encuentran por debajo de los valores de referencia (Han et al., 2012).

Kano investigó la estabilidad a la oxidación del éster PFAE con otro aceite que contiene ácidos grasos, demostrando que el PFAE mostró una alta biodegradabilidad y una excelente estabilidad a la oxidación (Kano, Suzuki, Oba, & Kanetani, 2012). Hiroki Kojima demostró que el PFAE tenía ciertas ventajas como alta permitividad, baja viscosidad cinemática y un alto punto de combustión en comparación con el aceite convencional (Kojima & Hayakawa, 2012). Luego, Alexandra Ciuriuc presentó un estudio comparativo del envejecimiento entre el aceite vegetal y el aceite mineral en transformadores de potencia, acelerando térmicamente su edad y propiedades dieléctricas, descubriendo que envejecían en diferentes momentos. Los resultados de esta investigación mostraron que la permitividad relativa y el factor de pérdida fueron mayores en los aceites vegetales, pero la resistividad fue menor en comparación con el aceite mineral. Otro resultado fue que el color del aceite mineral cambió significativamente a lo largo del tiempo, pero, con el aceite vegetal, esto no ocurrió. La tasa de variación de la parte real de la permitividad del aceite vegetal, el factor de disipación y la resistividad disminuyó con el tiempo (Ciuriuc et al., 2012).

Dumitran demostró el efecto del contenido de humedad sobre las propiedades eléctricas del aceite vegetal y mineral en 2013. En el aceite mineral se encontró una correlación entre la variación del contenido de humedad y las propiedades dieléctricas en comparación con los aceites vegetales. Esto significa que el contenido de humedad no es un factor incipiente para estimar la condición de envejecimiento del aceite vegetal (Dumitran, 2013). Bin Du presentó un nuevo tipo de nano fluido al agregar nanopartículas de Fe_3O_4 en aceite vegetal aislante; las principales propiedades eléctricas del aislamiento de nano fluidos a base de aceites vegetales se midieron y compararon con los parámetros del aceite vegetal. El contenido de agua que se disolvió en nano fluidos osciló entre 50 y 400 ppm, respectivamente. Los resultados observados indicaron que el contenido de agua juega un papel importante en las propiedades eléctricas del aislamiento de nano fluidos a base de aceite vegetal. Cuando el contenido de agua disuelta en el nanofluido es inferior a 300 ppm, tiene poco efecto sobre las propiedades eléctricas del nanofluido. Cuando el contenido es superior a 300 ppm, las propiedades eléctricas del nanofluido se reducen drásticamente (Du, Li, Wang, Xiang, & Zhang, 2013; Diaz et al., 2020).

En el año 2014, Arief, en un estudio comparativo entre PFAE, FR3 y aceite mineral, evidenció que el aceite vegetal tiene el potencial de reemplazar el aceite mineral a base de petróleo, ya que ambos aceites cumplen los criterios básicos como líquidos aislantes. Sin embargo, el aceite PFAE es el aceite de aislamiento preferido para reemplazar el aceite mineral debido a su alto valor de tensión de ruptura y alta capacidad en comparación con el aceite FR3. Asimismo, el aceite PFAE proporciona un valor de factor de disipación ligeramente mayor. Los aceites vegetales son acreditados como un buen material alternativo para el aceite de transformador porque son ecológicos y renovables. Por otro lado, los aceites minerales al no ser

renovables y no biodegradables, tienden a tener efectos negativos en el caso de una explosión causada por un transformador de alta tensión (Arief et al., 2014).

Umar Khayam, en el año 2014, concluyó que el aceite mineral tiene la capacidad de suprimir la difusión de burbujas mejor que los aceites vegetales enfocando su estudio en estas pruebas. Debido a su alta viscosidad cinemática, estos ésteres generaron muchos más gases que el aceite mineral, especialmente H_2 , y durante algún tiempo el envejecimiento del aceite mineral proporcionó mejores propiedades que este tipo de aceite en la formación de descargas parciales. Analizando el comportamiento del aceite PFAE y el éster 2H-08 ante la ocurrencia de descargas parciales y para compararlos con el aceite mineral, la comparación incluyó el número de repeticiones de DP, la carga promedio de DP y la generación de gases (Khayam, Susilo, Muslim, & Hikita, 2014).

En el año 2015, Delgado evaluó el rendimiento térmico experimentado por los materiales dieléctricos inmersos en transformadores, y dos puntos a destacar en su investigación fueron su capacidad de enfriamiento y su tasa de degradación. Los resultados mostraron que el grado de polimerización del papel dieléctrico sumergido en aceite vegetal es mejor que el sumergido en aceite mineral. Esto significa que el papel sumergido en aceite vegetal tiene una tasa de degradación mucho más baja a una temperatura dada. Si el grado de polimerización obtenido por el papel en aceite vegetal a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ se compara con el papel en aceite mineral a $130\text{ }^{\circ}\text{C}$, entonces se observa que la tasa de degradación es muy similar. La conclusión es que la diferencia entre la degradación experimentada por el papel sumergido en aceites vegetales y la degradación que corresponde al papel sumergido en aceite mineral se reduce porque los aceites vegetales alcanzan temperaturas más altas que el aceite mineral dentro de los transformadores (Delgado, Fernandez, Ortiz, Renedo, Ortiz., et al., 2015).

L. Syed Mohammed estudió las propiedades críticas de los aceites vegetales como el Punna, el aceite de salvado de arroz, el aceite de oleína de palma, el aceite de sésamo, el aceite de girasol, el aceite de neem, el aceite de ricino, el aceite de mostaza, el aceite de maní y el aceite de Mughwa, descubriendo que estos aceites tienen el potencial de reemplazar el aceite mineral aislado tradicional gracias a sus propiedades. Además concluye que se requieren investigaciones más profundas como la estabilidad oxidativa y el análisis del envejecimiento, antes de la aplicación de estos aceites como aislamiento líquido para garantizar la capacidad a largo plazo de resistir la tensión eléctrica y térmica (Mohammed, Bakruthen, Willjuice, & Karthik, 2015).

En el año 2016 se presenta un borrador para establecer un estándar PC57.147 / D3, febrero de 2016 - Guía borrador de IEEE para la aceptación y mantenimiento de líquido aislante de éster natural en transformadores que establece asistencia a los fabricantes de equipos y operadores de red para evaluar las condiciones y características que establezcan la aceptación y el mantenimiento del éster natural como líquido aislante en transformadores (Committee, Power, & Society, 2008).

Finalmente, entre los años 2017 y 2018, H. Hernández, J. Silva y M. Mejía estudiaron la viabilidad técnico-económica para este tipo de tecnología, demostrando que esta era altamente competitiva en el mercado de los transformadores eléctricos gracias a sus propiedades operativas, porque permitían tener un punto de inflamación y flameo mucho mayor que los aceites minerales, alta biodegradabilidad, propiedades no tóxicas y fácil proceso de reciclaje, concluyendo así que el régimen de temperatura de estos transformadores es más baja en condiciones de operación normal (Hernandez-Herrera et al., 2019).

Producción y Uso del Aceite Vegetal como Dieléctrico.

Investigaciones recientes han demostrado que el aceite vegetal es el fluido más adecuado para ser utilizado en transformadores de distribución o de potencia, reemplazando así el uso del aceite mineral y los ésteres sintéticos (Murdiya, 2015). Este aceite puede durar 30-40 años siempre que el transformador esté sellado herméticamente (Гредина, Научно-технической, ББК, & Гредина, 2010).

El aceite vegetal tiene algunos componentes que se degradan relativamente en poco tiempo y el grado de saturación es una indicación de inestabilidad térmica, volviéndose más inestable a medida que el grado de insaturación progresa de mono a tri. La inestabilidad de oxidación es de aproximadamente 1: 10: 100: 200 para aceites saturados, mono, di y tri-insaturados, respectivamente.

La presencia de cobre en el transformador aumenta la tendencia del aceite a oxidarse, lo que significa que se requieren inhibidores más fuertes en los aceites vegetales. Otro factor importante es la pureza del aceite, que debe estar libre de partículas conductoras a niveles aceptables (Murdiya, 2015).

El desarrollo de un aceite vegetal implica varias etapas (T. V. Oommen et al., 2000). La primera etapa es la selección adecuada de aceite; la segunda etapa es el proceso de purificación para cumplir con todos los requisitos eléctricos y, finalmente, la estabilización del aceite para resistir el entorno hostil del transformador.

Selección del fluido base

Las semillas oleaginosas constan de dos componentes: la parte oleosa; y la parte sólida que contiene proteínas comestibles. El aceite se extrae bajo un proceso llamado RBD ("refinado,

blanqueado y desodorizado") (The Coconut Diet, 2016). Para extraer la parte de grasa se utilizan solventes de hidrocarburos, que luego se eliminan; seguido por refinación y blanqueo, que implica el tratamiento con arcilla absorbente y filtración. También se utiliza un proceso de acondicionamiento invernal para eliminar las grasas saturadas fácilmente congeladas (EEAA. & EPAP., 2002). La Tabla 3 muestra los tipos de semillas típicos utilizados para la producción de aceites vegetales.

Tabla 3.

Propiedades y Tipos de Semillas Oleaginosas

Aceite Vegetal	% Ácido Saturado	% Ácido Graso Insaturado		
		Mono	Di	Tri
Aceite de canola	7.9	55.9	22.1	11.1
Aceite de maíz	12.7	24.2	58	0.7
Aceite de algodón	25.8	17.8	51.8	0.2
Aceite de cacahuete	13.6	17.8	51.8	0.2
Aceite de oliva	13.2	73.3	7.9	0.6
Aceite de cártamo	8.5	12.1	74.1	0.4
Aceite de cártamo con alto contenido oleico	6.1	75.3	14.2	-
Aceite de soja	14.2	22.5	51	6.8
Aceite de girasol	10.5	19.6	65.7	-
Aceite de girasol con alto contenido oleico	9.2	80.8	8.4	0.2

(Fofana, 2013).

Estabilización del aceite

El aceite vegetal tiende a degradarse cuando el proceso de oxidación ocurre al contacto con el aire debido a la insaturación inherente del aceite. La tasa de oxidación de los aceites mono- insaturados es baja, mientras que para los tri-insaturados es mayor (5,949,017, 1999).

El aceite vegetal destinado a transformadores eléctricos debe someterse a pruebas de oxidación, pues los antioxidantes pueden ayudar a proteger el aceite vegetal a pesar de que los

transformadores están sellados herméticamente; las fugas o las maniobras de mantenimiento podrían exponer el aceite al contacto con la atmósfera, y la constancia de esta exposición podría desgastar el aceite (Wflo & Manual, 2008).

Estructura molecular del éster natural.

Los fluidos de éster natural generalmente vienen en su forma nativa derivada de los procesos de extracción de aceite de soja. Este éster natural consiste en una mezcla de ácidos grasos y ésteres saturados (sin dobles enlaces C-C) y no saturados (con dobles enlaces C-C) (Silva-Ortega, Candelo-Becerra, Umaña-Ibañez, Mejia-Taboada, & Palacio-Bonill, 2016). Ver anexo 2.

Los ésteres a base de semillas, incluidas las grasas y los aceites líquidos, se derivan del glicerol y se conocen como triglicéridos. Los segmentos de ácidos grasos están compuestos por cadenas lineales, que tienen un número par de átomos de carbono (Mcshane, 1976a), siendo este el resultado natural de la biosíntesis de moléculas grasas donde se forman dos átomos de carbono al mismo tiempo (Mcshane, 1976b).

La estructura que se muestra a continuación es de un triglicérido, en el cual los grupos R, R' y R'' consisten en cadenas C8–22 donde los componentes de ácidos grasos son cadenas lineales de carbono largas (C14–22) que contienen de cero a tres enlaces dobles (McShane, 2002). La molécula de éster triglicérido puede representarse como se muestra en la Figura 2.

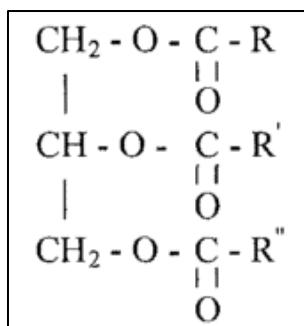


Figura 2. Estructura molecular de un triglicérido de origen natural (Mcshane, 1976b).

Casos de Éxito con Aceites Vegetales en Transformadores Eléctricos.

Actualmente se desconoce cuántos equipos de transformación, en el área de distribución y potencia, hay instalados. No obstante, en la Región Caribe Colombiana, especialistas de la empresa Electricaribe y de la Universidad de la Costa realizaron una prueba piloto con un total de 25 transformadores de distribución llamados: “Transformadores Ecológicos”. Estos equipos fueron instalados en las diferentes ciudades de la Región Caribe donde este proyecto permitió realizar las validaciones correspondientes y necesarias para continuar con su implementación. Para ello fue necesario realizar seguimiento a los equipos mediante la medición de parámetros eléctricos y de temperatura, a través de estudios termográficos (Hernandez-Herrera et al., 2019).

En la tabla 4 se muestran la cantidad de equipos instalados por potencia nominal y en la figura 3 se muestra el diseño de uno de los “Transformadores Ecológicos” (Hernandez-Herrera et al., 2019).

Ver todos los resultados en el Anexo 1 del presente documentos.

Tabla 4.

Detalle de equipos instalados en la Región Caribe

POTENCIA (kVA)	CANTIDAD DE EQUIPOS	TERMOPOZO
25	4	-
30	1	-
37,5	4	2
50	9	5
75	7	4

POTENCIA (kVA)	CANTIDAD DE EQUIPOS	TERMOPOZO
Total general	25	11

(Elaboración Propia).



Figura 3. Diseño de un transformador tipo utilizado para las pruebas piloto. Fuente: Elaboración Propia.

Capítulo II.

Aceites dieléctricos para transformadores

El aceite mineral, como medio aislante y refrigerante de los equipos de transformación, está siendo cuestionado por su impacto al medio ambiente (Bashi et al., 2006) debido a que es poco biodegradable y representa un riesgo exponencial ante una posible falla, derramamiento o fuga. Una vez cumplida su vida útil, el desecho del mismo se convierte en un inconveniente por la dificultad que genera el hecho de eliminarlo. Aunque se podría considerar tratarlo para poder reutilizarlo, este perdería muchas de sus propiedades y se obtendría un producto de menor calidad. Por otro lado, su elevado riesgo de explosión e incendio genera que se tomen mayores

medidas de seguridad en instalaciones internas (Hrkac, Papageorgiou, Kosmoglou, & Miatto, 2010).

El aceite vegetal es amigable con el medio ambiente, completamente biodegradable, renovable, disponible y es una alternativa sustentable y segura como medio aislante y refrigerante (Power, 2003).

Propiedades de los aceites dieléctricos.

El asilamiento líquido en equipos de transformación consta de tres características principales: Eléctricas, Físicas y Químicas, las cuales se describen a continuación:

Propiedades eléctricas.

Tensión de ruptura

Es la máxima tensión eléctrica que puede soportar un material dieléctrico sin fallos y es una de las pruebas más importantes realizadas a los aceites dieléctricos (ASTM, 2010). El campo eléctrico y la rigidez dieléctrica del líquido aislante son importantes en un sistema de alta tensión. Los factores más importantes que afectan la rigidez dieléctrica son la densidad, la temperatura y la humedad (Riveros D., 2012).

En la figura 4 (a. R. Marulanda et al., 2008)(a. R. Marulanda et al., 2008)se aprecia que las pruebas realizadas a los aceites cumplen con los requisitos mínimos establecidos para los aceites vegetales (ASTM D6871-03) (ASTM, 2003) y aceites minerales (ASTM D3487-16) (ASTM, 2016b). En el aceite vegetal los niveles de tensión de ruptura dieléctrica aumentan continuamente, mejorando con los años la vida útil de la resistencia del aceite dieléctrico (A. R. Marulanda et al., 2008).

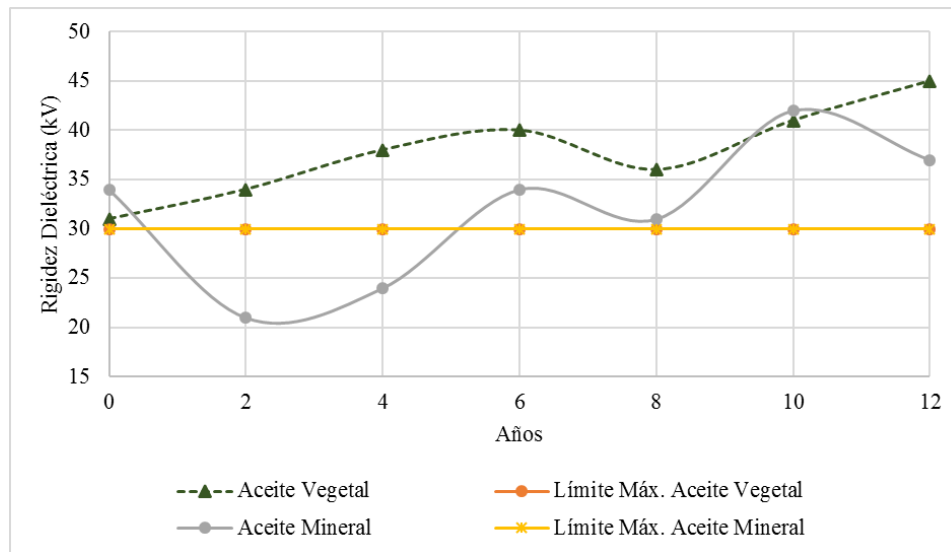


Figura 4. Tensión de ruptura en aceites vegetales y aceites minerales (A. R. Marulanda et al., 2008).

Formación de gases

El análisis de gases disueltos o DGA (por sus siglas en inglés) ha sido utilizado durante mucho tiempo como una herramienta eficaz y fiable para detectar fallas incipientes en transformadores con aceite mineral (Cotton, 2007). Empero, es necesario asegurar que la técnica de diagnóstico DGA se puede implementar para el análisis de otros ésteres (Sintéticos o Vegetales), por lo que es necesario determinar si se generan los mismos tipos de gases para identificar la tasa de generación y su concentración en referencia al aceite mineral (Cotton, 2007).

Fallas de gases desprendidos por fallos eléctricos simulados.

- *DGA por prueba de arco eléctrico (Bajas descargas de energía):*

La metodología implementada fue la aplicación mediante una aguja en configuración de electrodo plano, con una separación de aceite de 15mm. En la Tabla 5 se muestran los resultados

DGA normalizados tras la aplicación de 20 fallos por intervalos de un minuto entre descargas a los diferentes ésteres (Martin et al., 2006a).

El acetileno es un gas importante, producido durante la formación de arcos y es considerado como el principal indicador de este tipo de fallas (Nor Asiah Muhamad, Phung, & Blackburn, 2008). La producción de hidrogeno y etileno también son evidentes en cantidades significativas (Nor Asiah Muhamad et al., 2008). Aunque en los tres ésteres se produjo el mismo arco de energía, en el aceite mineral la concentración de etileno fue de 5 a 10 veces mayor que la encontrada en los demás ésteres (Martin et al., 2006a).

La concentración de acetileno, hidrógeno y etileno se encuentra en menores proporciones en el éster natural comparado con el aceite mineral. El éster con menor formación de gases es el sintético, aunque conocemos de su impacto negativo al medio ambiente (Martin, Khan, Dai, & Wang, 2006b).

En la siguiente tabla se muestra la concentración de gases generados después de la implementación de la prueba para cada tipo de aceite y el resultado es presentado en partes por millón (ppm).

Tabla 5.

Resultados DGA prueba de formación de arcos

Gases Producidos	Aceite Vegetal (ppm)	Aceite Mineral (ppm)	Aceite Sintético (ppm)
H₂	191	901	97
CH₄	14	145	9
C₂H₆	10	24	2
C₂H₄	63	270	26
C₂H₂	280	1540	126
CO	51	6	37

(Martin et al., 2006b).

- ***DGA por prueba de descargas parciales (DP):***

En este caso se implementó la prueba de descargas parciales (DP) para determinar la cantidad de gases disueltos por tipo de aceite. Para ello se utilizó el método de DP con arco eléctrico donde se empleó una resistencia de agua entre las fuentes de alta tensión para limitar la corriente de la prueba en caso de presentarse una falla accidental (Martin et al., 2006b). La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos tras la prueba DP durante una hora en los ésteres utilizados. Bajo esta prueba el éster natural presentó una gran producción de gases superando al aceite mineral. Los ésteres parecen ser más estables bajo rangos de fallas en temperaturas medias (Nor Asiah Muhamad et al., 2008). Sin embargo, los aceites vegetales producen una cantidad significativa de etanol bajo fallas térmicas, pudiendo ser un indicador clave (Martin et al., 2006b).

Tabla 6.

Resultados DGA prueba de descargas parciales

Gas Producido	Aceite Vegetal (ppm)	Aceite Mineral (ppm)	Aceite Sintético (ppm)
H₂	23	20	5
CH₄	2	2	2
C₂H₆	1	0	0
C₂H₄	2	2	0
C₂H₂	2	2	0
CO	8	2	2

(Martin et al., 2006b).

En lo que respecta a la formación de gases por fallas eléctricas, la presencia del acetileno es el gas clave que indica alta descarga energética de arcos eléctricos, y el hidrógeno el gas clave que indica bajas descargas parciales de energía (N A Muhamad, Phung, Blackburn, & Lai, 2008). Bajo las mismas fallas eléctricas, los ésteres sintéticos y naturales generan entre cinco y

diez veces menos gases en comparación con el aceite mineral (Martin et al., 2006b; N A Muhamad et al., 2008).

Propiedades Físicas

Viscosidad

El sistema de refrigeración es el principal mecanismo de eliminación de calor en los equipos de transformación y la viscosidad es importante para las funciones de refrigeración interna del equipo (Support, 2016). La viscosidad de un fluido aislante afecta la capacidad de transferir el calor por conducción (Cargill, 2013). Por lo tanto, un líquido con baja viscosidad permite una disipación más eficiente del calor mientras que un líquido con mayor viscosidad permite que se tengan mayores puntos de alta temperatura en el interior del transformador (Rycroft, 2014). Las pruebas realizadas al aceite demuestra que la implementación del éster natural en transformadores resulta en un aumento de las temperaturas entre 1° y 3° C (Hernandez-Herrera et al., 2019; Rycroft, 2014).

Punto de fluidez

El punto de fluidez es el punto más bajo de temperatura en el que un aceite dieléctrico fluirá al interior de un transformador (Rafiq et al., 2015). Es una medida útil para ver cómo es el comportamiento del material (Éster Natural) a bajas temperaturas, en especial cuando se requiere un arranque en frío del equipo para asegurar que el aceite circulará y cumplirá con su propósito de aislante y refrigerante sin ningún inconveniente (Lewand, 2005).

Los fluidos dieléctricos a base de aceite vegetal tienen temperaturas relativamente altas de solidificación incluso con aditivos depresores (Lewand, 2005). Una prueba realizada a una mezcla de soja/girasol muestra que el punto de fluidez varía en función de las proporciones de los aceites; sin embargo, las mezclas no varían en el tiempo de solidificación (-15°C) (Rapp,

1999). Estas pruebas revelan que un transformador puede ser energizado a temperaturas en fase sólida sin efectos adversos (Rapp, 1999).

Los aceites vegetales tienen un punto más alto de fluidez que el aceite mineral, rango de -15°C a -25°C (Related et al., 2003), pero las pruebas han demostrado éxito de arranque en frío a -30°C (Ruijin Liao, Hao, Chen, Ma, & Yang, 2011). La congelación y descongelación del éster natural no representa ningún efecto negativo sobre sus propiedades eléctricas físicas o químicas (Rapp, 1999).

Inflamabilidad: Punto de inflamación y Punto de combustión.

El éster natural o aceite vegetal es uno de los líquidos refrigerantes y aislantes más seguros, con puntos de inflamación y combustión por encima de los 300°C (con un punto de combustión de aproximadamente 350°C y un punto de inflamación de aproximadamente unos 330°C) (Hernandez-Herrera et al., 2019; Silva-Ortega et al., 2016; Silva, Lopes, Macedo, Costa, & Almeida, 2016). Este aceite aislante y refrigerante es clasificado como uno de “los fluidos aislantes eléctricos menos inflamables”. La IEC 61100 clasifica a los equipos que utilizan este aceite como dieléctrico con letra “K” en lugar de la tradicional letra “O” usada para los aceites minerales (esta letra describe el código de enfriamiento del aceite) (IEC, 2009, 2011).

Temperatura de operación.

Esta característica influye en el tiempo de vida útil del aislamiento de papel, el cual se degrada en función del líquido aislante y la temperatura (Asano & Page, 2014). Las pruebas experimentales indican que es posible operar un transformador a temperaturas más altas con aceite vegetal que con su homólogo el aceite mineral. Las mediciones de temperatura son realizadas midiendo “Puntos Calientes” en los bobinados del transformador (Margalló Gasco, 2012); un incremento significativo en la temperatura de operación del transformador significa un

aumento de la carga. Esto es una consideración importante teniendo en cuenta las características de este tipo de aceite (Margalló Gasco, 2012).

Propiedades Químicas

Absorción de agua.

En la Figura 5 se presenta la solubilidad del agua de los aceite minerales y aceites vegetales (Committee et al., 2008). Esto le permite al fluido eliminar más humedad del papel aislante, brindándole un mejor rendimiento dieléctrico, eliminando la posibilidad de formación de burbujas de vapor durante la sobrecarga repentina y reduciendo la velocidad de envejecimiento del papel (Stockton et al., 2007). El aceite vegetal mantiene una mayor resistencia dieléctrica, especialmente a temperaturas frías, debido a que tiene una curva de saturación más favorable en comparación con el aceite mineral. A pesar de esto la temperatura de punto de fluidez es significativamente mayor que el aceite mineral, como se refleja en los resultados obtenidos de los estándares IEEE (Committee et al., 2008; Stockton et al., 2007).

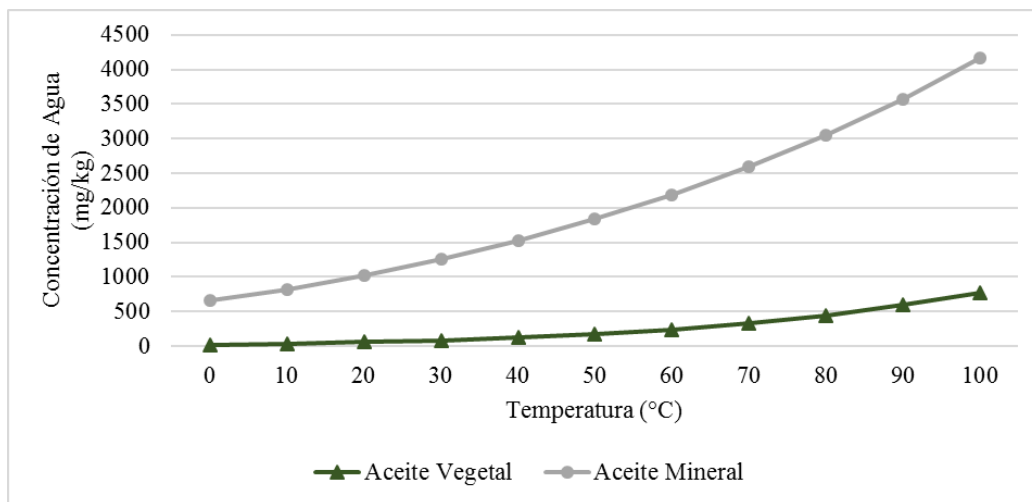


Figura 5. Saturación de agua del aceite mineral y el aceite vegetal (Committee et al., 2008).

Estabilidad a la oxidación.

En los inicios se planteó que los aceites vegetales no tenían la propiedad de estabilidad de oxidación (Patrick McShane et al., 2006). Este planteamiento surge como resultado de las pruebas realizadas a los ésteres bajo los métodos de las normas ASTM D2112 (Standard Test Method for Oxidation Stability of Inhibited Mineral Insulating Oil) (ASTM, 2016a) y ASTM D2440 (Standard Test Method for Oxidation Stability of Mineral Insulating Oil) (ASTM, 2013). Cuando estos métodos se aplican a estos tipos de aceites, los resultados tienden a ser negativos debido a la naturaleza de las pruebas, debido a que estas están diseñadas para los inhibidores usados en el aceite mineral (Patrick McShane et al., 2006).

La razón por la que se debe poner la lupa a la estabilidad de oxidación es por la degradación de los componentes constructivos en su interior. Cuando este fenómeno se presenta en el aceite mineral, desencadena la formación de lodo (Patrick McShane et al., 2006); sin embargo, los aceites vegetales se oxidan de forma muy diferente debido a la composición química del fluido. Estos tienden a polemizar causando un aumento gradual de la viscosidad (Stockton et al., 2007). Debido a esto, los aceites vegetales están diseñados para su uso en transformadores herméticamente sellados (Mcshane & Luksich, 1999).

Los aceites vegetales tienen la tendencia a formar películas delgadas al momento de la polimerización sobre superficies calientes expuestas a mucho aire con más rapidez que el aceite mineral (Stockton et al., 2007). Esta película tiene excelentes propiedades dieléctricas pero pueden afectar el funcionamiento mecánico e incrementar el factor de potencia de la bobina; por ende, estos efectos deben ser evitados (Patrick McShane et al., 2006).

Propiedades medio ambientales

Para determinar que un componente es ambientalmente seguro se utilizan dos criterios básicos: Baja toxicidad y Biodegradabilidad. La formulación final del éster natural se puso a prueba de Biodegradabilidad y pudo ser clasificado en las categorías de APA como “biodegradable a largo plazo” y “fácilmente biodegradable” (Mcshane & Luksich, 1999). No obstante, luego de aplicar una prueba de toxicidad acuática aguda al aceite vegetal (OECD Guidelines & Development Economic Cooperation and, 1992), este no superó la prueba, con una tasa de mortalidad del 100 % en 24 horas, debido a la formulación del éster, donde se determinó que la causa de esta alta tasa de mortalidad estaba ligada al inhibidor de oxidación a pesar de ser calificado como comestible (Mogozine, 2000). Finalmente se halló un inhibidor de oxidación igualmente eficaz, con las mismas cualidades eléctricas y biodegradables (Mcshane et al., n.d.). Para esta nueva formulación los resultados fueron mortalidad CERO durante el período de prueba estándar de 96 horas a 1000 mg/kg (Mogozine, 2000).

Comparación entre los diferentes tipos de aceites

La Tabla 7 muestra una comparación entre las propiedades físicas, químicas y eléctricas del aceite vegetal comparado con las propiedades del aceite sintético y del aceite mineral (Yves Bertrand & Lauzevis, 2013).

Tabla 7.

Datos típicos para los diferentes fluidos

Propiedades		Aceite Vegetal	Aceite Sintético	Aceite Mineral
Viscosidad cinemática ($mm^2.s^{-1}$)	at 0°C	200	350	55
	at 40°C	40	30	10
	at 100°C	9	5	3
Punto de Fluidez		-15	-60	-55

Propiedades	Aceite Vegetal	Aceite Sintético	Aceite Mineral
Punto de Inflamación (°C) <i>Copa Cerrada</i>	290	270	140
Punto de Combustión (°C) <i>Copa Abierta</i>	330	310	180
Tensión de Ruptura (kV)	55	60	65
Factor de Disipación Dieléctrica ($\tan \delta$) at 90°C	0.02	0.02	0.0001
Permeabilidad relativa at 90°C	3.0	3.2	2.2
Densidad a 20°C (kg.m ⁻³)	930	970	890
Valor de Acidez/Neutralización (mgKOH.g ⁻¹)	0.05	0.02	0.01
Saturación de Agua (mg.kg ⁻¹)	≈ 2.000	≈ 1.500	≈ 50
Conductividad Térmica at 20°C (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0.17	0.16	0.14
Calor Especifico at 20°C (kJ.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1.9	1.95	1.9
Coeficiente de Expansión (10 ⁻³ .K ⁻¹)	0.7	0.74	0.75
Biodegradabilidad después de 28 días (%)	>90 Fácil	-	<40 Lenta

(Yves Bertrand & Lauzevis, 2013).

Comparación del rendimiento entre el aceite vegetal y el aceite mineral.

El aceite mineral es comúnmente utilizado como líquido aislante y refrigerante en transformadores de distribución y de potencia, es obtenido mediante la destilación del petróleo y el tratamiento con ácido sulfúrico refinado. Las características finales del aceite mineral convencional dependen de su composición química (Fong & Ruiz, n.d.).

Por otro lado, los aceites vegetales reúnen todas las condiciones principales para funcionar como líquido aislante y refrigerante en equipos de transformación, pues su empleo mejora las propiedades ambientales y de seguridad de resistencia al fuego (Vukovi, Jovalekic, & Tenbohlen, 2012). Los aceites vegetales tienen un alto porcentaje de biodegradación e incluso son amigables con el medio ambiente (Vihacencu, Ciuriuc, & Dumitran, 2013).

Biodegradabilidad del Aceite Dieléctrico

El término biodegradabilidad hace referencia a la medida en que un fluido es metabolizado por microbios naturales, bien sea en cuerpos de agua o en el suelo (CIGRE working group A2-

35, 2010). El aceite vegetal o éster natural hace de esta propiedad una de sus ventajas y novedades frente a los aceites minerales y ésteres sintéticos, al ser considerado un líquido “fácilmente biodegradable” (Silva-Ortega et al., 2016). El grado de biodegradación esta entre 70-100 %, como lo han mostrado diferentes investigaciones (Aluyor et al., 2009). La Figura 6 muestra los porcentajes de biodegradación del aceite vegetal comparado con el aceite mineral y ésteres sintéticos:

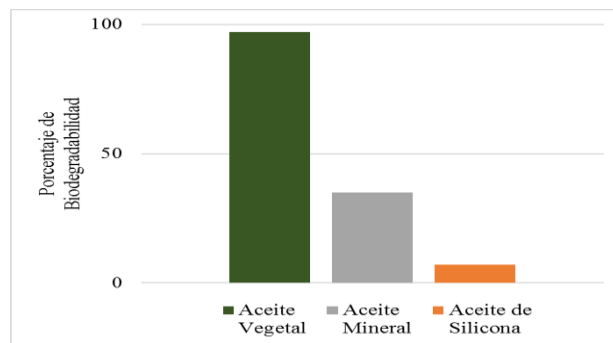


Figura 6. Comparación de los porcentajes de biodegradación (CIGRE working group A2-35, 2010; T V Oommen, 1995).

Estabilidad a la oxidación

Los resultados de un experimento hecho con aceite de palma (PFAE, por sus siglas en inglés) reflejaron que la estabilidad a la oxidación de este aceite vegetal es superior al del aceite mineral debido a que, durante las pruebas, se presentaron pocos cambios tanto en la tensión de ruptura como en el índice de acidez total (Kanoh et al., 2008).

Punto de inflamación y combustión

Los límites de temperatura juegan un papel determinante en los aceites dieléctricos de origen vegetal al momento de verlos como el posible sustituto de los aceites minerales. La figura 7 muestra una comparación entre el aceite vegetal, sintético y mineral, respecto a riesgo de

incendio, demostrando mayores beneficios y ventajas al utilizar los aceites vegetales como medios aislantes y refrigerantes (Y. Bertrand & Hoang, 2003a). El punto de inflamación y combustión de este aceite se encuentran por encima de los 300°C (Li et al., 2012). Caso similar ocurre con los ésteres sintéticos con valores por encima de los 300°C, pero ubicados en una categoría diferentes según la IEC 61039 (IEC, 2009), mientras que en los aceites minerales estos puntos se encuentran en un rango de 160-180°C (P Boss et al., 1999).

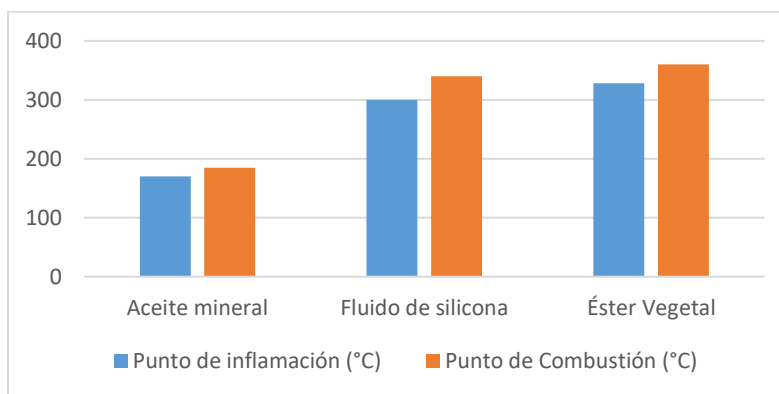


Figura 7. Desempeño de los diferentes fluidos con respecto al riesgo de incendios (Y. Bertrand & Hoang, 2003b).

Viscosidad

La viscosidad de los diferentes aceites indica que el aceite vegetal tiene una mayor viscosidad comparado con el aceite mineral (Mohammed et al., 2015). La prueba de viscosidad aplicada en aceites vegetales (Aceite de Palma y Aceite de coco) y en aceites minerales, nuevos y envejecidos, demostró que el aceite en condiciones iniciales (sin envejecer) la viscosidad del aceite mineral era muy baja (Divakaran, 2012).

Al someter a los aceites a un proceso de envejecimiento con cobre, durante 30 días, la viscosidad en el aceite de palma aumentó en comparación con el aceite mineral (Divakaran, 2012). Después de realizada la prueba se presentó una baja viscosidad en el aceite mineral y de

coco, y en el aceite de palma una alta viscosidad (Divakaran, 2012). La Figura 8 muestra que la viscosidad de diferentes aceites indica que todos los aceites vegetales tienen una viscosidad más alta que la del aceite mineral:

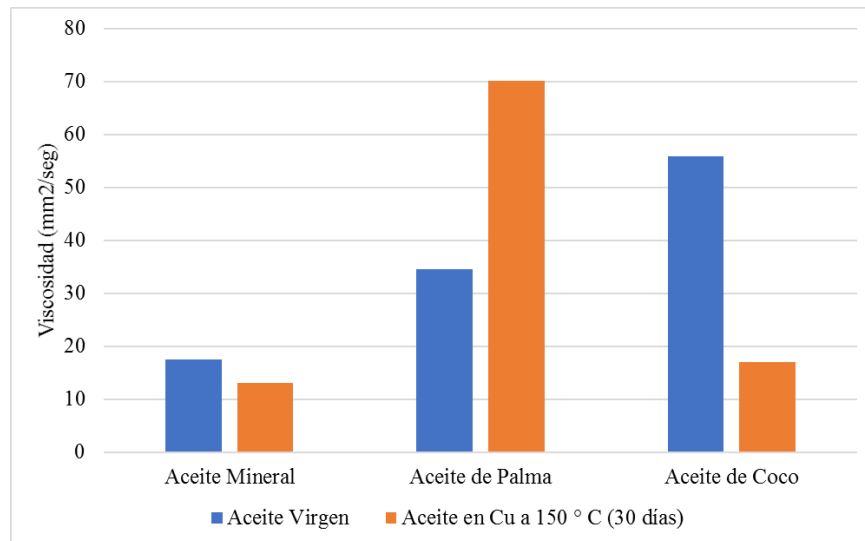


Figura 8. Viscosidad de diferentes aceites a diferentes condiciones de envejecimiento (Divakaran, 2012).

Formación de gases

Los aceites utilizados en los equipos de transformación como medio aislante y refrigerante experimentan estrés térmico y eléctrico, por lo que es importante analizar los efectos que se producen bajo estas condiciones térmicas y eléctricas. La formación de gases es la propiedad más sencilla de medir, siendo importante para estudiar la formación de gases después del envejecimiento en presencia del cobre por cierto periodo de tiempo (T V Oommen, 1995). La Figura 9 muestra los porcentajes de gases generados por dos aceites vegetales (T V Oommen, 1995).

Los aceites vegetales producen grandes cantidades de CO y CO₂, debido a que los ésteres líquidos contienen un grupo carbonilo COO que se descompone para generar los gases

mencionados anteriormente. El hidrógeno es obtenido gracias a la presencia de ciertos aditivos (ejemplo los del aceite FR3) y estos gases, junto al metano, son los que más se producen en condición de descargas parciales. La cantidad de metano y de hidrógeno producido es similar a las cantidades elaboradas en aceites minerales (B.C. Ким, 2008). Adicionalmente, lo más importante del análisis hecho a la producción de gases en los aceites dieléctricos es que el total de gas producido por el aceite vegetal es solo un cuarto del total de gases producidos por el aceite mineral. Esto muestra la capacidad de extinción de arco de los aceites vegetales (T. V. Oommen et al., 2000),(B.C. Ким, 2008). Una comparación entre los porcentajes de gases producidos por un aceite vegetal y un aceite mineral es presentada en la Figura 9.

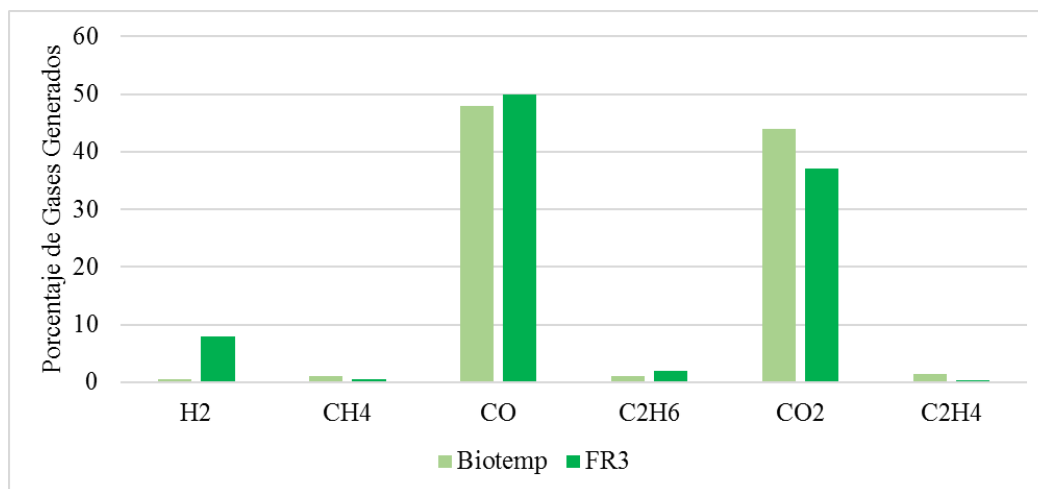


Figura 9. Porcentaje de gases producidos por dos aceites vegetales (T V Oommen, 1995).

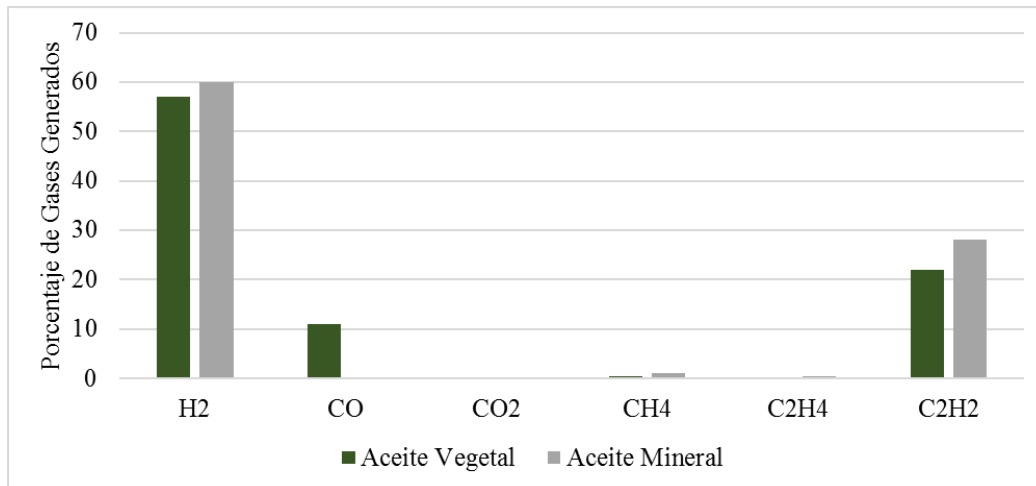


Figura 10. Porcentaje de producción de gases en aceites vegetales y minerales (B.C. Ким, 2008).

Rigidez Dieléctrica

Existen dos mecanismos para que el aceite de un transformador aumente el contenido de agua. El primero, a través de la absorción de la atmósfera, lo cual es poco probable, ya que estos generalmente se encuentran sellados; y el segundo, por el envejecimiento del aislamiento de la celulosa (Martin et al., 2006b). En los aceites vegetales la humedad tiene menor impacto en la resistencia dieléctrica debido a que son más higroscópicos en comparación con el aceite mineral (Martin et al., 2006b).

El porcentaje de agua que puede existir en el estado disuelto está ligado a una constante de temperatura que es directamente proporcional a la humedad del aire, incrementando la temperatura mientras aumenta la cantidad de muestras que se pueden disolver en el aceite. Finalmente, es el porcentaje de saturación de agua en el aceite el que afecta la tensión de ruptura en lugar del contenido absoluto de humedad (Martin et al., 2006b; Martin & Wang, 2006). Los resultados de unas pruebas realizadas en la ciudad de Manchester, hechos por Martin and Wang, exponen que las tensiones de rupturas media del éster vegetal son más altas que la del aceite mineral (Martin & Wang, 2006).

Capítulo III

Resultados de la investigación.

Aspectos Para el Diseño de Transformadores de Distribución.

De acuerdo con la información y comparaciones realizadas en la investigación que lleva por título: “Análisis Comparativo De Los Materiales Utilizados En Transformadores De Distribución Sumergidos En Aceite Vegetal”, se pudo determinar que los aceites dieléctricos de origen vegetal, no sólo presentan beneficios de carácter ambiental, sino que también contribuyen con el tiempo de vida útil del aislamiento sólido, que es una pieza fundamental para el transformador y su correcto funcionamiento (Caballero, Pizarro, Silva, & Mejía, 2017), ver Anexo 3.

En cuanto a la compatibilidad entre los diferentes materiales relacionados con los transformadores, los fabricantes de los fluidos evaluados coinciden en que no existen inconvenientes con los materiales utilizados en la construcción de los transformadores sumergidos en aceite mineral. A pesar de lo anterior, los empaques son la excepción debido a que estos se pueden deteriorar en caso de no ser compatibles con el aceite vegetal; por tanto, la selección del material de los empaques debe hacerse con extremo cuidado.

Por otra parte, los empaques de cauchos naturales tienen un buen comportamiento ante la presencia de los aceites minerales, de tal manera que es posible inferir que la aplicación de estos, en la línea de los aceites dieléctricos naturales, podría tener resultados favorables o incluso mejores que los obtenidos con el dieléctrico mineral debido a que ambos son elementos naturales. El estudio de compatibilidad de los empaques (encargados de la hermeticidad), con los aceites dieléctricos vegetales, puede convertirse en un aporte importante en la búsqueda de mejoras que permitan al aceite mantenerse en buenas condiciones ya que estos fluidos son susceptibles a la oxidación.

Teniendo en cuenta los valores de algunas de las propiedades (número de neutralización, número de ácido total, viscosidad, entre otras), expuestas en la tabla comparativa de los aceites, es posible deducir que el aceite ENVIROTEMP FR3 se encuentra en ventaja frente a los otros dos fluidos (BIOTEMP, ADV 1601) porque realiza la transferencia de calor de una mejor forma, al ser menos viscoso. Además, al tener un menor número de neutralización será menos propenso a la oxidación, propiedad química que coloca en desventaja estos ésteres con respecto al mineral, puesto que son considerados de fácil oxidación.

Análisis Técnico-Económico para Transformadores de Distribución con Aceite Vegetal.

El número de transformadores de distribución analizados fue de catorce, en una prueba piloto desarrollada por Investigadores de la Universidad de la Costa y el operador de red Electricaribe (Anexo 4 y Anexo 5). La mitad de las muestras recogidas pertenecen a transformadores que operaban con aceite mineral, mientras que el resto de muestra fue tomada sobre transformadores que funcionan con aceite vegetal.

Para este análisis se agruparon los transformadores de acuerdo con sus características técnicas y el régimen de cargabilidad de cada uno, tal como se muestra en la tabla 8. En la tabla referida se exhibe una relación entre los transformadores con aceite mineral sustituidos, y los instalados con aceite vegetal, así como el departamento donde se encuentran instalados. Cabe resaltar que las potencias nominales analizadas corresponden a las capacidades en potencia comúnmente instaladas en los sistemas de distribución local con nivel de 13.8 kV.

Tabla 8.

Capacidad nominal de los transformadores instalados en la Región Caribe Colombiana

Departamento	Transformadores de Distribución con Aceite Mineral		Transformadores de Distribución con Aceite Vegetal	
	Potencia (kVA)	Cantidad	Potencia (kVA)	Cantidad
GUAJIRA	75	1	75	1
	37.5	1	37.5	1
	50	1	50	1
MAGDALENA	50	2	50	2
	37.5	1	37.5	1
CÓRDOBA	75	1	75	1
	37.5	1	37.5	1
	37.5	1	37.5	1
SUCRE	75	1	75	1
	50	1	50	1
	50	2	50	2
BOLIVAR	75	2	75	2
	25	1	25	1
	37.5	1	37.5	1
CESAR	30	1	30	1
	50	2	50	2
ATLÁNTICO	75	1	75	1
	75	1	75	1
	50	1	50	1
	50	1	50	1
TOTAL	---	22	---	22

(Hernandez-Herrera et al., 2019).

La termografía infrarroja (IRT por sus siglas en inglés) es una técnica aplicada en sistemas eléctricos y mecánicos gracias a su característica no intrusiva, permitiendo analizar datos obtenidos gracias a un dispositivo de imagen térmica sin contacto (Arfaoui, Polidori, Taiar, & Popa, 2012).

Para las muestras de termografía realizadas a la totalidad de transformadores fue necesario tener en cuenta la hora de la toma de la muestra (entre las 11:00 a.m., y las 15:00 p.m.), la temperatura ambiente (temperaturas entre 32 °C y 34 °C) y el estado del clima (cielo despejado con baja nubosidad). En la tabla 9 se presentan los resultados obtenidos de la termografía aplicada a los transformadores descritos en la Tabla 8.

Tabla 9.

Resultados de la IRT aplicada a transformadores con aceite mineral y aceite vegetal

Departamento	Potencia	Aceite	Aceite
	(kVA)	Mineral (°C)	Vegetal (°C)
GUAJIRA	75	37,9	36,8
	37.5	40,4	37,8
	50	40,1	37,3
MAGDALENA	50	44,9	41,7
	50	42,5	40,3
CÓRDOBA	37.5	45,4	39,6
	75	43,4	37,5
	37.5	44,5	38,3
SUCRE	75	39,7	37,4
	50	43,9	39,8
BOLIVAR	50	39,9	36,5

Departamento	Potencia	Aceite	Aceite
	(kVA)	Mineral (°C)	Vegetal (°C)
	50	44,1	40,5
	75	40,7	38,6
	75	46,2	41,47
	25	42,8	38,7
	37.5	43,6	38,7
CESAR	30	43,9	39,1
	50	43,1	39,7
ATLÁNTICO	50	42,7	39,3
	75	43,7	40,2
	75	45,6	41,8
	50	46,3	42,5

(Elaboración Propia).

En la tabla 9 se puede evidenciar una reducción en la temperatura de los transformadores con aceite vegetal un 9 %, en promedio, con una variación mínima del 3 % y una máxima del 14 % en comparación con los transformadores que utilizaban aceite mineral (Fernando-Navas et al., 2012; Hernandez-Herrera et al., 2019).

En la figura 11 se muestra un ejemplo de una imagen termográfica (IRT), tomada sobre un transformador con aceite vegetal, y los puntos de interés a estudiar en los transformadores de distribución objeto de la presente investigación (parte superior de la cuba del transformador, área central y área inferior del transformador).

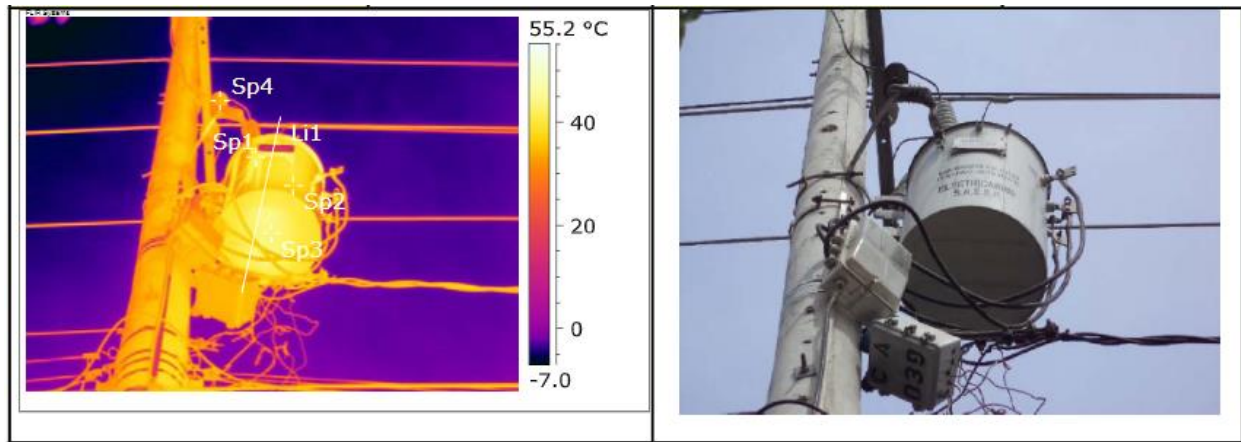


Figura 11. Imagen termográfica (IRT) tomada a uno de los transformadores con aceite vegetal instalados. Fuente: (Elaboración Propia).

La figura 12 presenta una comparación térmica entre los transformadores instalados y los resultados de las pruebas termográficas aplicadas a estos.

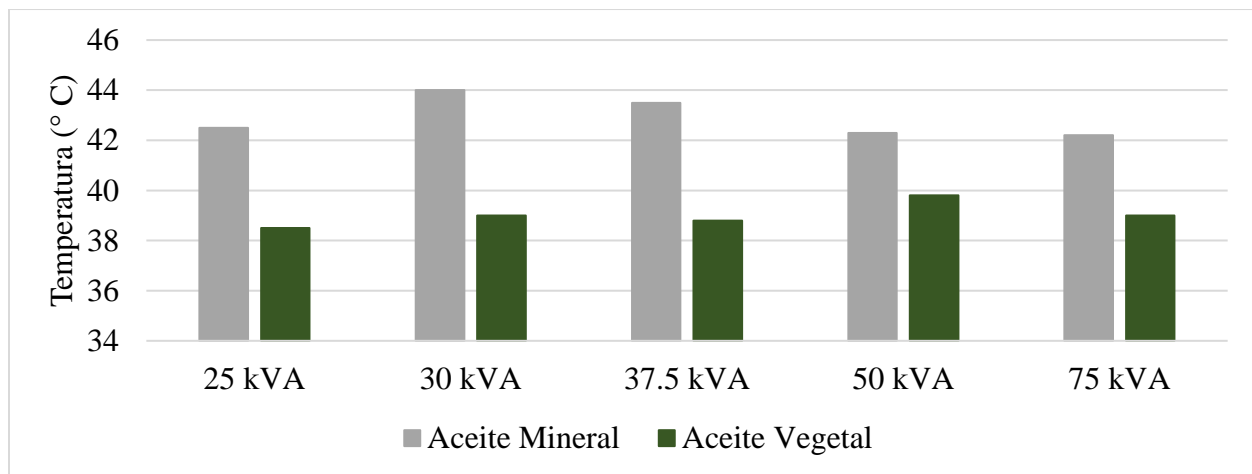


Figura 12. Comparación térmica de los transformadores de distribución instalados. Fuente: Elaboración Propia.

Los análisis técnicos realizados a las pruebas termográficas arrojaron que la temperatura en transformadores de distribución, que usan aceite vegetal como medio aislante y refrigerante, son menores en comparación a los transformadores con aceite mineral. Esto se presentó independientemente de la potencia del equipo analizado, lo cual indica que, acorde a la presente

investigación y tomando como referencia las investigaciones realizadas por expertos, se tiene una alta probabilidad de alargar la vida útil del equipo y obtener un mayor desempeño. Para la valoración económica es necesario contextualizar el mercado y la legislación colombiana. Por ley, en Colombia se tiene establecido el pago de impuestos a cualquier tipo de productos disponibles en el mercado (IVA). Este impuesto es equivalente al 19 % del valor neto del producto. Sin embargo, en el caso de los transformadores eléctricos que usan aceite vegetal como medio aislante y refrigerante, estos se encuentran exentos de este impuesto debido a que el Gobierno estableció que aquellos productos basados en la Eficiencia Energética, Energías Renovables y Protección Ambiental, no tendrían que hacer el pago de este impuesto soportado por la Ley 1715-2014 Colombiana (Colombia, 2014).

La Tabla 10 resume el beneficio económico del uso de aceites vegetales como aceite dieléctrico y su estado competitivo en comparación con los aceite minerales, reflejando que su beneficio económico se encuentra ligado directamente al beneficio medioambiental, de acuerdo a la resolución 0563 de 2012 establecida por la Unidad de Planeamiento Minero Energético en Colombia (UPME, 2012).

Tabla 10.

Costos asociados a la adquisición de equipos de transformación llenados con aceite mineral vs transformadores llenados con aceite vegetal en Colombia

Potencia del Transformador (kVA)	Llenado con Aceite Mineral	Valor Final Después de IVA (+19%)	Llenado con Aceite Vegetal	Valor Final	Diferencia Entre Aceite Vegetal con Respecto al Aceite Mineral.
25	\$ 855	\$1.017	\$ 1.026	\$1.026	+0.8%
50	\$ 1.201	\$1.429	\$ 1.501	\$1.501	+5%
75	\$ 1.516	\$1.804	\$ 1.971	\$1.971	+9%
112.5	\$ 2.070	\$2.464	\$ 2.338	\$2.338	-5%
600	\$13.333	\$15.867	\$ 14.632	\$14.63	-8%

(Hernandez-Herrera et al., 2019).

El costo asociado a la compra del equipo de transformación con aceite vegetal se encuentra desviado del costo de un transformador convencional entre un 0.8 % y un 9 %. No obstante, la diferencia en precios no es tan influyente teniendo en cuenta el número de fallas registrada por la Empresa Electricaribe S.A. E.S.P. ante la SSPD y la UPME con relación a lo establecido en la resolución CREG 025 de 2018.

En base al reporte de incidencias, remitido por la empresa Electricaribe S.A. E.S.P. para el año 2019, que debe hacerse trimestralmente de acuerdo con lo indicado en la Res. CREG 015 de 2018, se relaciona el número de fallas y cantidad de horas registradas para activos del sistema de distribución local (SDL) de acuerdo con lo establecido en el capítulo 5 de dicha resolución, los numerales derivados de la misma y teniendo en cuenta los indicadores de referencia como lo son el SAIDI y SAIFI.

SAIDI: Indicador de duración promedio de los eventos sucedidos en el SDL del OR j , durante el año t . [horas/año]

SAIFI: Indicador de frecuencia promedio de los eventos sucedidos en el SDL del OR j , durante el año t . [veces/año]

A continuación, se presentan los costos asociados a fallas en transformadores de distribución, considerando las horas de indisponibilidad y la cantidad de energía no suministrada, (ENS) producto de las fallas, así como el costo incurrido por la empresa distribuidora de energía al realizar el mantenimiento de los equipos, validando si, entre las fallas reportadas, se encuentra alguno de los transformadores instalados con aceite vegetal. En la Tabla 11 se muestra el reporte de incidencias relacionado con fallas en transformadores de distribución.

Tabla 11.

Reporte de Incidencias en Transformadores de Distribución con Base a la Resolución CREG 015 de 2018

Casuística	Potencia Nominal del Transformador	Número de incidencias registradas por casuística	Número de horas de indisponibilidad (h)	Demanda no Atendida – (DNA) (MW)	Energía No Suministrada – (ENS) (GW/h)
Falla	25.0	186	2093	4,702	9,8412
Transformador de	50.0	540	7513	5,045	37,9048
Distribución	75.0	876	11931	26,643	317,8648

(Elaboración Propia).

Es importante resaltar que desde la instalación de la prueba piloto, ejecutada en la Costa Caribe colombiana hasta diciembre del año 2019, no se presentó ninguna incidencia asociada a los “Transformadores Ecológicos” por la casuística de “Falla Transformador de Distribución”. Con base en esto, y con los datos obtenidos del reporte entregado por Electricaribe a diciembre de 2019, podemos observar que Las mayores pérdidas económicas para la empresa se ven reflejadas en los transformadores de distribución de 75 kVA, debido a que estos aportan un total de 26 MW en DNA, quintuplicando el aporte de un transformador de 50 kVA, y aumentando considerablemente el aporte de un transformador de 25 kVA.

Finalmente, teniendo en cuenta que adquirir transformadores con estas características de potencia cuesta un 0,8 % o 9 %, por encima del costo de un transformador con aceite mineral, y que hasta la fecha del último reporte entregado a la UPME no se han presentado incidencias asociadas a estos equipos por la casuística antes mencionada, a continuación procedemos a realizar una valoración económica de un transformador de 75 kVA, con la metodología implementada por Electricaribe, para valorar sus proyectos de inversión en las redes de media tensión.

Para esto es importante tener en cuenta que la valoración económica de un proyecto de media tensión se hace en base con los costos regulados, tomando como referencia los valores establecidos en la resolución CREG 015 de 2018. Así, los beneficios son calculados teniendo en cuenta alguno de los siguientes criterios:

1. Energía no suministrada o Confiabilidad en una ventana de 35 año (para este caso será de 25 años).
2. Pérdidas técnicas en una ventana de 35 año (para este caso será de 25 años).
3. Nueva Demanda en una ventana de 35 año (para este caso será de 25 años).
4. Racionamiento (agotamiento) en una ventana de 35 año (para este caso será de 25 años).
5. AOM y BRANE.

Consideraciones:

- La valoración B/C fue realizada con transformador de 75 kVA, sacando un promedio de horas de indisponibilidad sobre el total de fallas del año para determinar la DNA promedio de un transformador de esta capacidad.
- Para la proyección de DNA se utilizaron las Proyecciones Regionales de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia - Revisión abril 2019, Tabla 14, en escenario alto para la UCP de Barranquilla (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2019), presentando, para el escenario máximo de 2020, un incremento del 1,2 % con respecto al histórico de 2019. En la Tabla 12 se reflejan los porcentajes de crecimiento anual para la UCP en revisión.

Tabla 12.

Proyección Regional de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia

UCP Barranquilla			
Año	Porcentaje de Crecimiento	Año	Porcentaje de Crecimiento
2020	1,00%	2025	1,00%
2021	1,60%	2026	1,00%
2022	1,00%	2027	1,00%
2023	1,00%	2028	1,00%
2024	1,00%	2029	1,00%

Revisión Abril 2019, Demanda UCP Anual – UCP de Barranquilla

- Se tomó como referencia la unidad constructiva N1T8 – Transformador Aéreo Monofásico urbano de 75 kVA por \$ 7'932.000 por ser el de menor valoración. Otras unidades constructivas reconocen, bajo diferentes características, un transformador con esta potencia con un mayor valor.
- Para los beneficios económicos se tomó como criterio “Racionamiento (agotamiento)”, en una ventana de 20 año para transformadores con aceite mineral y de 25 años para transformadores con aceite vegetal, teniendo en cuenta la vida útil de cada uno.

Un transformador de 75 Kva, por fallas propias del equipo, en promedio puede presentar un total de 13,6 horas de indisponibilidad y un total de 68 kVA en promedio de demanda no atendida (DNA), lo cual expresado en ENS es equivalente a 0,0009 GW/h.

Para determinar los beneficios del uso de un transformador convencional, inmerso en aceite mineral, fue necesario tomar las 21900 horas que tiene un año y restarle el valor del promedio de horas de incidencias registrada para un transformador de 75 kVA. Mientras que, para un transformador con aceite vegetal, el beneficio durante los primeros siete años es absoluto teniendo en cuenta que a la fecha no se ha presentado ninguna incidencia con la casuística “Falla Transformador de Distribución” y, suponiendo que a partir del año siete podrían comenzar a presentarse fallas de este tipo, los resultados fueron proyectados con base en los valores de la Tabla 12.

Los costos de inversión para la instalación de un transformador con aceite vegetal y un transformado con aceite mineral, calculado con una tasa de descuento de 11.64% a 25 y 20 años respectivamente, son presentado en la Tabla 13.

Tabla 13.

VPN de costos de inversión, AOM y BRANE

Costos	[VPN]	
	Aceite Vegetal	Aceite Mineral
Inversión	7.8 MCOP	7.2 MCOP
AOM	1.5 MCOP	1.5 MCOP
BRANE	1.5 MCOP	1.5 MCOP

(Elaboración Propia).

El valor presente neto de los beneficios técnicos, calculado con una tasa del 11.64% a 25 años, se relacionan en la Tabla 14:

Tabla 14.

VPN Beneficios asociados al proyecto

Beneficio por ENS	Ahorros [VPN]
Aceite Vegetal	23,8 MCOP
Aceite Mineral	19,8 MCOP

(Elaboración Propia).

Finalmente, con toda la información obtenida de los cálculos antes presentados en la Tabla 15, se presenta la evaluación de la rentabilidad para ambas tecnologías:

Tabla 15.

Evaluación Económica Transformadores de Distribución con Aceite Vegetal y Aceite Mineral

	Transformador con aceite Vegetal	Transformador con aceite Mineral
Años retorno de la inversión	4,3 años	4 años
Relación Beneficio/costo	2.18	1.96
TIR	33,61 %	34.41 %
VPN	13 MCOP	10 MCOP

(Elaboración Propia).

Un análisis de confiabilidad, realizado a un transformador de distribución con aceite vegetal y a un transformador con aceite mineral, teniendo en cuenta las consideraciones antes mencionadas, arrojó los siguientes resultados:

- La implementación de un transformador con aceite vegetal mejora la confiabilidad de un CT durante toda su vida útil 54,6 MWh/año (ahorro de aproximadamente 73,8 MCOP)

- Un transformador con aceite mineral sólo mejora la confiabilidad del mismo CT de referencia 35,72 MWh/año (ahorro de aproximadamente 48,3 MCOP).

En la Figura 13, se presenta el flujo de caja resultante de un proyecto con la instalación de un transformador con aceite vegetal frente un transformador que usa aceite mineral como medio aislante y refrigerante.

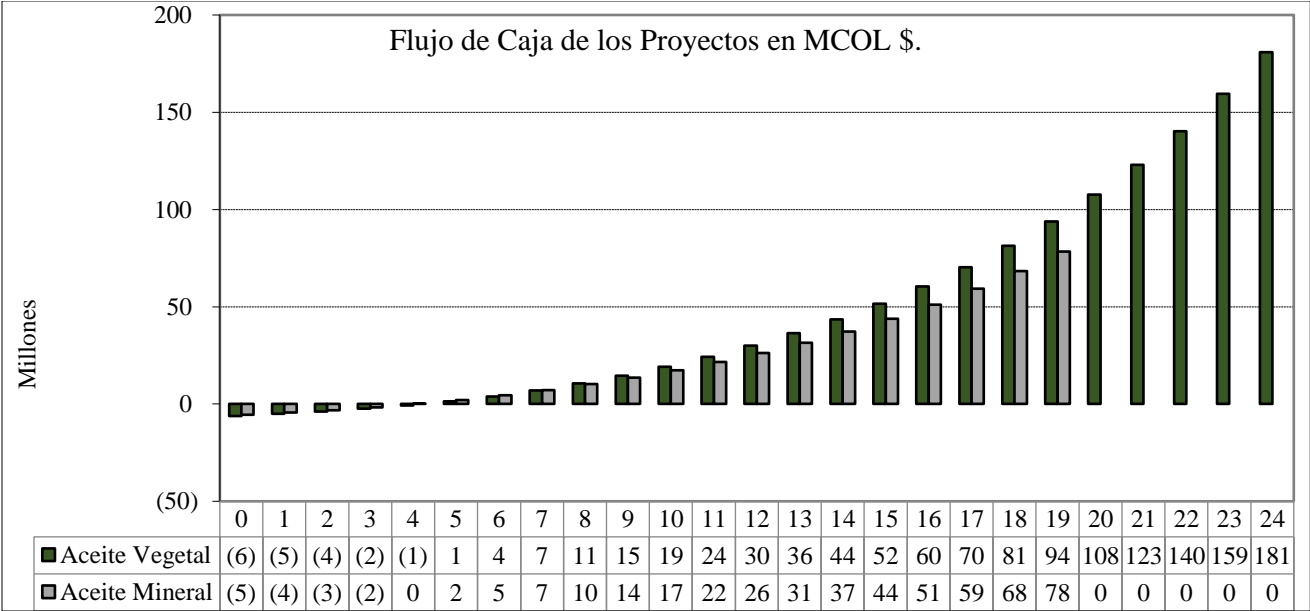


Figura 13. Flujo de caja de un proyecto con transformadores inmersos en aceite vegetal y un proyecto de transformadores inmersos en aceite mineral. Fuente: elaboración propia

El desarrollo de la metodología implementada puede ser validado en los Anexos 6 y 7 del presente documento.

De los resultados obtenidos en la evaluación técnico-económica realizada se puede concluir que, a pesar de que la inversión inicial, así como los costos de AOM y BRANE, son similares para ambas tecnologías, las principales diferencias se presentan en los beneficios que brindan cada una de estas, considerando la vida útil que brinda cada uno de los tipos de transformación teniendo en cuenta sus características. De acuerdo con lo anterior y a la

evaluación económica realizada, los transformadores con aceite vegetal ofrecen una mejor relación B/C (2.18), así como una menor TIR y un mayor VPN, en comparación a los transformadores con aceite mineral, además de una extensión en la vida útil, representando mayores ganancias para la empresa inversionista.

Conclusiones

Con base en la exhaustiva revisión bibliográfica, desarrollada en la presente investigación, se pudo describir la evolución histórica de las investigaciones relacionadas con el uso de los aceites vegetales en los equipos eléctricos como medio refrigerante y aislante, concluyendo que los beneficios del aceite vegetal son numerosos gracias a sus propiedades dieléctricas y refrigerantes, tales como: alto punto de inflamación y combustión ($< 300\text{ }^{\circ}\text{C}$), baja toxicidad (completamente libres de PCB), y alta biodegradabilidad en comparación con los otros aceites. También se pudo constatar que estos aceites permiten alargar la vida útil del aislamiento sólido del equipo, el cual es pieza fundamental para el transformador. Se prevé una sustitución tecnológica, significativa a nivel de transformadores de distribución, gracias a que este aceite cumple con los requisitos mínimos necesarios para salvaguardar el funcionamiento del equipo de transformación y el entorno circundante.

Los transformadores que usan aceite vegetal como medio aislante y refrigerante operan en regímenes de temperaturas más bajas, en condiciones de operación normal, y reducen el impacto ambiental ante posibles fallas de los equipos, a diferencia de los transformadores de distribución con aceites minerales o sintéticos.

La compatibilidad entre los materiales constructivos de un transformador con aceite mineral y de un transformador con aceite vegetal, no representa mayores riesgos o inconvenientes para su adaptación o reemplazo debido a que los materiales utilizados en la construcción de los transformadores mostraron un adecuado desempeño a lo largo de la investigación realizada, sin registro de fallas en los transformadores ecológicos instalados por la empresa de energía de la Región Caribe colombiana.

El costo de inversión entre los transformadores de distribución con aceite vegetal varía entre un 0,8 % y un 9 % respecto a un transformador con aceite mineral, teniendo en cuenta que la desviación en el valor comercial depende directamente de la potencia del transformador.

Asumiendo que este tipo de aceite (aceite vegetal) es capaz de alarga la vida útil del equipo de transformación, es posible obtener mayores beneficios al implementar este tipo de tecnología, ofreciendo una relación Beneficio/Costo mayor a la unidad con una TIR más baja en comparación a un transformador con aceite mineral.

Finalmente gracias a las publicaciones científicas, la presentación de una propuesta de norma ante el Comité Técnico ICONTEC 130 de Transformadores Eléctricos y el subcomité 130A de Aceites Dieléctricos (anexo 8), así como a los trabajos de consultorías realizados, la Empresa de Distribución y Comercialización de Energía en la Región Caribe tomó la decisión de comenzar con la sustitución tecnológica de un número significativo de transformadores a lo largo del territorio donde opera actualmente, demostrando así que los resultados obtenidos en la presente investigación fueron fundamentales para la inclusión de esta tecnología en los sistemas eléctricos de distribución local (SDL).

De acuerdo a lo anterior podemos inferir que la implementación de los aceites vegetales, como medio aislante y refrigerante en transformadores eléctricos de distribución, son técnica y económicamente viables debido a los diferentes beneficios y propiedades que este aceite brinda en comparación con el aceite mineral.

Trabajos Futuros

Al culminar este trabajo de investigación quedan abiertas algunas líneas investigativas que permiten dar continuidad a la temática desarrollada. Algunas de estas son resultado de cuestionamientos que surgieron en el transcurrir de este trabajo, pero que no fueron posibles tratar en este documento.

A continuación, se resume lo que se considerarían trabajos investigativos futuros:

- Optimización del diseño de un transformador de distribución y sus componentes constructivos.
- Análisis técnico del comportamiento de los aceites vegetales en equipos de potencia asociados a subestaciones de conexión al STR y STN (Nivel 3, 4 y 5).
- Estudios de mantenimiento enfocados a transformadores eléctricos de distribución y de potencia que usan aceite vegetal como medio aislante y refrigerante.
- Procesos de regeneración de los aceites vegetales para alargar su vida útil, garantizando las propiedades físicas, técnicas y eléctricas de los estándares nacionales e internacionales.
- Estudio de compatibilidad de los empaques (encargados de la hermeticidad) con el uso de los aceites dieléctricos de origen vegetal.

Referencias

- Al-ammam, E. A., & Qureshi, M. I. (2009). Probing the Use of Green Insulating Oils in Transformers Based on Their Statistical Breakdown Data.
- Aluyor, E. O., Obahiagbon, K. O., & Ori-jesu, M. (2009). Biodegradation of vegetable oils : A review. *Solutions*, 4(6), 543–548.
- Arfaoui, A., Polidori, G., Taiar, R., & Popa, C. (2012). Infrared Thermography in Sports Activity. In *Infrared Thermography* (pp. 141–168). <https://doi.org/10.5772/1353>
- Arief, Y. Z., Ahmad, M. H., Lau, K. Y., & Oil, A. T. (2014). A Comparative Study on the Effect of Electrical Ageing on Electrical Properties of Palm Fatty Acid Ester (PFAE) and FR3 as Dielectric Materials, 128–133.
- Asano, R., & Page, S. A. (2014). Reducing Environmental Impact and Improving Safety and Performance of Power Transformers With Natural Ester Dielectric Insulating Fluids, 50(1), 134–141.
- ASTM. D6871-03: Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus, 10 ASTM § (2003). <https://doi.org/10.1520/D6871-03R08.2>
- ASTM. (2010). D2864-10e1: Standard Terminology Relating to Electrical Insulating Liquids and Gases, (July), 1–9.
- ASTM. D2440-13: Standard Test Method for Oxidation Stability of Mineral Insulating Oil (2013). <https://doi.org/10.1520/D2440-13.2>
- ASTM. D2112-16: Standard Test Method for Oxidation Stability of Inhibited Mineral Insulating Oil (2016). <https://doi.org/10.1520/D2112-15.2>
- ASTM. D3487-16: Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus, 10 § (2016). <https://doi.org/10.1520/D3487-09.2>

- Bashi, S. M., Abdullahi, U. U., Yunus, R., & Nordin, A. (2006). Use of Natural Vegetable Oils as Alternative Dielectric Transformer Coolants. *The Institution of Engineers, Malaysia*, 67(2), 4–9.
- Bertrand, Y., & Hoang, L. C. (2003a). Vegetal oils as substitute for mineral oils. *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.03CH37417)*, 2, 491–494. <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2003.1218460>
- Bertrand, Y., & Hoang, L. C. (2003b). Vegetal Oils as Substitute for Mineral Oils. In *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June* (pp. 491–494). Nagoya.
- Bertrand, Y., & Hoang, L. C. (2004). D1-202 VEGETABLE OILS AS SUBSTITUTE FOR MINERAL INSULATING OILS IN MEDIUM-VOLTAGE EQUIPMENTS, 1–6.
- Bertrand, Yves, & Lauzevis, P. (2013). Development of a Low Viscosity Insulating Liquid Based on natural Esters for Distributions Transformers. In *22nd International Conference on Electricity Distribution* (pp. 10–13). Stockholm.
- Boss, P, Sa, A. B. B. S., Oommen, T. V, & T, A. B. B. P. (1999). NEW INSULATING FLUIDS FOR TRANSFORMERS BASED ON BIODEGRADABLE HIGH OLEIC VEGETABLE OIL A N D ESTER FLUID.
- Boss, Pierre, Sc, C., & The, I. (2000). Insulating fluids for power transformers, 1–8.
- brettis. (2017). Tutoriales Lubricación. Módulo 8: Transformadores. Madrid, España: BRETTIS. Retrieved from <http://www.brettis.com/Tutorial/08Transformadores.pdf>
- Caballero, P., Pizarro, K., Silva, J., & Mejía, M. (2017). *Análisis Comparativo De Los Materiales Utilizados En Transformadores De Distribución Sumergidos En Aceite Vegetal*. Universidad de la Costa.

- Cannon, G. S., & Kotowski, J. A. (2002). *US 6,340,658 B1*. United States. Retrieved from <http://www.google.com/patents/US6340658>
- Cargill. (2013). EnvirotempTM FR3TM Fluid. R2020 Reference Data.
- Chistyakov, A. V., Tsodikov, M. V., Zharova, P. A., Kriventsov, V. V., Corbetta, M., & Manenti, F. (2017). The direct hydrodeoxygenation of vegetable oil over Pt-Sn/Al₂O₃ catalysts. *Chemical Engineering Transactions*, 57, 871–876. <https://doi.org/10.3303/CET1757146>
- CIGRE working group A2-35. (2010). *Experiences in Service with New Insulating Liquids*. United Kingdom: Zhongdong Wang (UK). Retrieved from http://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/New_Experiences_in_Service_with_New_Insulating_Liquids.pdf
- Ciuriuc, A., Vihacencu, M. S., Dumitran, L. M., & Notingher, P. V. (2012). Comparative Study on Power Transformers Vegetable and Mineral Oil Ageing. *IEEE Explore*, 12, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICATE.2012.6403401>
- Colombia, C. De. (2014). *LEY 1715 Mayo de 2014. Presidencia de la Republica*. Retrieved from [http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/LEY 1715 DEL 13 DE MAYO DE 2014.pdf](http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/LEY_1715_DEL_13_DE_MAYO_DE_2014.pdf)
- Committee, T., Power, I., & Society, E. (2008). *IEEE Std C57.147TM-2008, IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers*.
- Cotton, I. (2007). Dissolved Gas Analysis of Alternative, 23(5), 5–14.
- Delgado, F., Fernandez, I., Ortiz, F., Renedo, C., Ortiz, A., & Carcedo, J. (2015). Thermal Analysis of Transformers Insulation Based on Vegetable Esters. In *Electrical Insulation Conference (EIC), 2015 IEEE* (pp. 7–10). <https://doi.org/10.1109/ICACACT.2014.7223488>
- Delgado, F., Fernandez, I., Ortiz, F., Renedo, C., Ortiz, A., & Carcedo, J. (2015). Thermal analysis

- of transformers insulation based on vegetable esters. *33rd Electrical Insulation Conference, EIC 2015*, (June), 606–609. <https://doi.org/10.1109/ICACACT.2014.7223488>
- Discussion, P., Hopkinson, P., Fellow, I., Panel, O., Dix, P. L., Ieee, M., ... Moore, H. R. (2009). Progress Report On Natural Esters For Distribution And Power Transformers, 3–5.
- Divakaran, D. (2012). INVESTIGATION OF LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE CHARACTERISTICS AND OTHER THERMO-PHYSICAL CHARACTERISTICS OF VEGETABLE OILS FOR POWER APPARATUS APPLICATIONS, 28–31.
- Du, B., Li, J., Wang, B., Xiang, J., & Zhang, Z. (2013). Influence of Water Content on the Electrical Properties of Insulating Vegetable Oil-Based Nanofluids, (June), 49–51.
- Dumitran, L. M. (2013). Thermal Ageing Effects on the Dielectric Properties and Moisture Content of Vegetable and Mineral Oil Used In Power Transformers.
- Edf, R., France, D., Lauzevis, P., & France, E. (2013). 22 nd International Conference on Electricity Distribution Paper 0382 DEVELOPMENT OF A LOW VISCOSITY INSULATING LIQUID BASED ON NATURAL ESTERS FOR DISTRIBUTION TRANSFORMERS Chemistry of natural esters , triglycerides and 22 nd International Conference on , (0382), 10–13.
- EEAA., & EPAP. (2002). Inspection Manual Oil Oil, Soap and Detergents Industry, (June).
- EPA. (1998). *OPPTS 835.3100. Aerobic Aquatic Biodegradation. Fate, Transport and Transformation Test Guidelines*. (Thomas A. Edison Technical Center, Ed.). Franksville (USA): Cooper Power Systems.
- Fernando-Navas, D., Cadavid-Ramírez, H., & Echeverry-Ibarra, D. F. (2012). Aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores eléctricos. *REDALYC*, Vol. 16, n, 201–223.

Fofana, I. (2013). 50 Years in the Development of Insulating Liquids, 29(5).

Fong, I. A., & Ruiz, A. T. De. (n.d.). *El petróleo y su proceso de refinación. Universidad Tecnológica de Panamá*. Retrieved from [http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/proyecto/publicacioneselectro/monografias/El petróleo y su proceso de refinación.pdf](http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/proyecto/publicacioneselectro/monografias/El_petróleo_y_su_proceso_de_refinación.pdf)

Gasser, H. P., Krause, C., Lashbrook, M., & Martin, R. (2011). Aging of Pressboard in Different Insulating Liquids.

Ghani, S. A., Muhamad, N. A., Noorden, Z. A., Zainuddin, H., Bakar, N. A., & Talib, M. A. (2018). Methods for improving the workability of natural ester insulating oils in power transformer applications: A review. *Electric Power Systems Research*, 163, 655–667. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.10.008>

GlobalTox International Consultants. (1999). *Final Report: Acute Trout Toxicity Testing for Two Envirotemp FR3 Formulations*. Guelph, ON, Canada.

Guo, P., Liao, R., Hao, J., Ma, Z., & Yang, L. (2012). Research on the Temperature Dielectric Spectrum of Vegetable Oil , Mineral Oil and Their Relevant Oil- impregnated Papers, 1–4.

Han, J., Qiu, W., Wang, W., Cao, H., Yao, D., & Preparation, A. (2012). Application of Insulating Camellia Oil in High Fire Resistance Transformer, 1–4.

Hemmer, M., Badent, R., & Leibfried, T. (2003). Electrical properties of vegetable oil- impregnated paper insulation. *2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 60–63. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2003.1254794>

Hernandez-Herrera, H., Silva-Ortega, J. I., Mejia-Taboada, M., Diaz Jacome, A., & Torregroza-Rosas, M. (2019). Natural ester fluids applications in transformers as a sustainable dielectric and coolant. *AIP Conference Proceedings*, 2123(1), 20049.

<https://doi.org/10.1063/1.5116976>

- Herrera, J. C., Chamorro, C. R., & Martín, M. C. (2015). Experimental analysis of performance, greenhouse gas emissions and economic parameters for two cooling systems in a public administration building. *Energy and Buildings*, 108, 145–155.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.007>
- Hosier, I. L., Vaughan, A. S., & Montjen, F. A. (2006). Ageing of biodegradable oils for high voltage insulation systems, 481–484.
- Hosier, I. L., Vaughan, A. ., Sutton, S. ., & Davis, F. . (2005). Chemical and Physical Properties of Aged Dodecylbenzene Insulating Oil, 225–228.
- Hrkac, M., Papageorgiou, P., Kosmoglou, I., & Miatto, G. (2010). BIOTEMP ® Transformer Technology for Innovative Compact Substation, (November), 1–6.
- IEC. IEC 61039-08: General classification of insulating liquids, Pub. L. No. CEI/IEC/TS 60076-14:2004, 1 (2009).
- IEC. IEC 60076-2: Power transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers (2011).
- Ilyas, M., & Sample, A. (2008). Effects of temperature on Dielectric properties of Rhicinnus Oils as insulating liquid, 0–3.
- Jeong, J., An, J., & Huh, C. (2012). Accelerated Aging Effects of Mineral and Vegetable Transformer Oils on Medium Voltage Power Transformers, 156–161.
- Kanno, M., Oota, N., Suzuki, T., & Ishii, T. (2001). Changes in ECT and Dielectric Dissipation Factor of Insulating Oils Due to Aging in Oxygen, 8(6), 1048–1053.
- Kano, T., Suzuki, T., Oba, R., & Kanetani, A. (2012). Study on the Oxidative Stability of Palm Fatty Acid Ester (PFAE) as an Insulating Oil for Transformers, 22–25.

- Kanoh, T., Iwabuchi, H., Hoshida, Y., Yamada, J., Hikosaka, T., Yamazaki, A., ... Corporation, L. (2008). Analyses of Electro-Chemical Characteristics of Palm Fatty Acid Esters as Insulating Oil, (1), 2–5.
- Khayam, V., Susilo, A., Muslim, J., & Hikita, M. (2014). Partial Discharge Characteristics and Dissolved Gas Analysis of Vegetable Oil, 330–333.
- Kojima, H., & Hayakawa, N. (2012). Charge Behavior in Palm Fatty Acid Ester Oil (PFAE) / Pressboard Composite Insulation System under Voltage Application, (1), 419–423.
- Lewand, L. R. (2005). *Laboratory Testing of Natural Ester Dielectric Liquids*.
- Li, J., Zhang, Z., Grzybowski, S., & Liu, Y. (2012). Characteristics of Moisture Diffusion in Vegetable Oil-paper Insulation, 1650–1656.
- Liao, Rui-jin, Xiang, B., Yang, L., & Tang, C. (2008). Study on the Thermal Aging Characteristics and Bond, 291–296.
- Liao, Ruijin, Hao, J., Chen, G., Ma, Z., & Yang, L. (2011). A comparative study of physicochemical, dielectric and thermal properties of pressboard insulation impregnated with natural ester and mineral oil. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 18, 1626–1637. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.6032833>
- Margalló Gasco, I. (2012). Diagnóstico del consumo de vida de un transformador a través del análisis de compuestos furánicos. *Universidad Carlos III de Madrid.*, 1–70.
- Martin, D., Khan, I., Dai, J., & Wang, Z. D. (2006a). An Overview of the Suitability of Vegetable Oil Dielectrics for Use in Large Power Transformers By. *Euro TechCon*, 4–23.
- Martin, D., Khan, I., Dai, J., & Wang, Z. D. (2006b). An Overview of the Suitability of Vegetable Oil Dielectrics for Use in Large Power Transformers By, 4–23.
- Martin, D., & Wang, Z. D. (2006). A Comparative Study of the Impact of Moisture on the

Dielectric Capability of Esters for Large Power Transformers, 409–412.

Marulanda, a. R., Artigas, M. a., Gavidia, a., Labarca, F., & Paz, N. (2008). Study of the vegetal oil as a substitute for mineral oils in distribution transformer. *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, T and D-LA*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2008.4641781>

Marulanda, A. R., Artigas, M. A., Gavidia, A., Labarca, F., & Paz, N. (2008). Study of the vegetal oil as a substitute for mineral oils in distribution transformer, 1–6.

Mcshane, C. P. (1976a). Natural and Synthetic Ester Dielectric Fluids: Their Relative Environmental, Fire Safety, and Electrical Performance.

Mcshane, C. P. (1976b). New Dielectric Coolant Concepts for Distribution and Power Transformers, 55–62.

Mcshane, C. P. (2001). Relative Properties of the New Combustion-Resistant Vegetable-Oil-Based Dielectric Coolants for Distribution and Power Transformers, 37(4), 1132–1139.

McShane, C. P. (2002). Vegetable-oil-based dielectric coolants. *IEEE Industry Applications Magazine*, 8(3), 34–41. <https://doi.org/10.1109/2943.999611>

Mcshane, C. P., Corkran, J., Ieee, M., Rapp, K., Luksich, J., Since, A., & Power, C. (n.d.). Natural Ester Dielectric Fluid Development, 1–5.

Mcshane, C. P., & Luksich, J. (1999). Fire Resistant Natural Ester Dielectric Fluid and Novel Insulation System for Its Use, 890–894.

McShane, C. P., Rapp, K. J., Corkran, J. L., Gauger, G. a., & Luksich, J. (2002). Aging of Kraft Paper in Natural Ester Dielectric Fluid ester oil Aging Time (hours) Degree of Polymerization. *Proceedings of 14th International Conference on Dielectric Liquids*, (Icdl), 173–177.

- Mogozine, A. (2000). New safety dielectric coolants for distribution and power transformers. *IEEE Industry Applications Magazine*, 24–32. <https://doi.org/10.1109/2943.838037>
- Mohammed, L. S., Bakruteen, M., Willjuice, M., & Karthik, M. (2015). STUDIES ON CRITICAL PROPERTIES OF VEGETABLE OIL BASED INSULATING FLUIDS, 1–4.
- Muhamad, N A, Phung, B. T., Blackburn, T. R., & Lai, K. X. (2008). Dissolved Gas Analysis of Faults in Bio- degradable Oil Transformer Insulating Systems.
- Muhamad, Nor Asiah, Phung, B. T., & Blackburn, T. R. (2008). Dissolved Gas Analysis (DGA) of Ar c ing Faults in Biodegradable Oil Insulation Systems.
- Murdiya, F. (2015). *RESEARCH ON CREEPING DISCHARGE PHENOMENA IN INSULATING OILS : VEGETABLE-BASED OILS AS SUBSTITUTE OF.*
- Murphy, J. R., Member, S., & Graham, J. (2009). Distribution Utility Experience with Natural Ester Dielectric Coolants, 9–11.
- OECD Guidelines, O., & Development Economic Cooperation and. Fish, Acute Toxicity Test, OECD 203, Effects on Biotic Systems.pdf (1992).
- Oommen, T. V., Claiborne, C. C., Walsh, E. J., & Baker, J. P. (2000). A New Vegetable Oil Based Transformer Fluid: Development and Verification. In *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (pp. 308–312).
- Oommen, T V. (1995). Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers. *Electrical Insulation Magazine*, 18(1), 6–11.
- Oommen, T V, Claiborne, C. C., Walsh, E. J., & Nc, R. (1998). Introduction of a New Fully Biodegradable Dielectric Fluid, 1–4.
- Oommen, Thottath V, & Clair borne, C. C. (1999). 5,949,017. United States. Retrieved from <http://www.google.com/patents/US5949017>

- Patrick McShane, C., Corkran, J., Rapp, K., & Luksich, J. (2006). Natural ester dielectric fluid development. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 18–22. <https://doi.org/10.1109/TDC.2006.1668445>
- Power, C. (2003). Aging of paper insulation retrofitted with natural ester dielectric fluid.
- Rafiq, M., Lv, Y. Z., Zhou, Y., Ma, K. B., Wang, W., Li, C. R., & Wang, Q. (2015). Use of vegetable oils as transformer oils – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 308–324. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.032>
- Rapp, K. J. (1999). Behavior of Ester Dielectric Fluids Near the Pour Point, 5–8.
- Rebolledo Lozano, G. A. (2014). *Evaluación De La Viabilidad Técnica Y Económica De La Utilización Del Aceite Dieléctrico Vegetal Como Sustituyente Del Aceite Dieléctrico Mineral En Transformadores De Distribución Nuevos Y Usados En Las Empresas Municipales De Cali*. Universidad Autónoma de Occidente.
- Related, S., The, T. O., Of, T., Of, D., & Chemicals, O. (2003). INTRODUCTION TO THE OECD GUIDELINES FOR TESTING OF CHEMICALS SECTION 3, (July), 1–12.
- Riveros D., C. F. (2012). *PRUEBAS DIELECTRICAS A TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION SUMERGIDOS EN ACEITE DE ORIGEN VEGETAL*. SANTIAGO DE CALI.
- Rycroft, M. (2014). Vegetable oil as insulating fluid for transformers. *Energize*, (April), 37–40. Retrieved from <http://www.ee.co.za/wp-content/uploads/2014/04/energize-april-14-p-37-40.pdf>
- Sagastume Gutiérrez, A., Cabello Eras, J. J., Sousa Santos, V., Hernández Herrera, H., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2018). Electricity management in the production of lead-acid batteries: The industrial case of a production plant in Colombia. *Journal of Cleaner Production*,

- 198(0959–6526), 1443–1458. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.105>
- Silva-Ortega, J. I., Candelo-Becerra, J. E., Umaña-Ibañez, S. F., Mejia-Taboada, M. A., & Palacio-Bonill, A. R. (2016). Power Distribution Transformers using Natural Ester Fluids as Dielectric and Coolant. *INGE CUC*, 12(2), 79–85. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17981/ingecuc.12.2.2016.08>
- Silva, W. J. N. da, Lopes, L. W., Macedo, A. E. R. de, Costa, D. B. da, & Almeida, A. A. F. de. (2016). Reduction of Risk Factors in Patients with Behavioral Dysphonia After Vocal Group Therapy. *Journal of Voice: Official Journal of the Voice Foundation*. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2016.01.007>
- Stockton, D. P., Bland, J. R., Mcclanahan, T., Wilson, J., Harris, D. L., & Mcshane, P. (2007). NATURAL ESTER TRANSFORMER FLUIDS: SAFETY , RELIABILITY & ENVIRONMENTAL PERFORMANCE, 1–7.
- Support, R. (2016). What is viscosity. Retrieved from <http://www.rm-support.nl/index.php/expert-advice/item/http://www.rm-support.com/expert-advice/html.html>
- The Coconut Diet. (2016). How is Coconut Oil Produced? Retrieved from http://www.coconutdiet.com/what_is_virgin_coconut_oil.htm
- Unidad de Planeación Minero-Energética. (2019). PROYECCIÓN REGIONAL ENERGÍA ELÉCTRICA Y Revisión Abril 2019, 87. Retrieved from http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/Proyeccion_Demanda_Regional_Energia_Abr_2019.pdf
- UPME. Res. 0536 - 2012, Pub. L. No. 0536–2012 (2012). Colombia.
- Vihacencu, M. Ş., Ciuriuc, A., & Dumitran, L. M. (2013). Experimental study of electrical properties of mineral and vegetable transformer oils. *UPB Scientific Bulletin, Series C:*

- Electrical Engineering*, 75(3), 171–182. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84894199395&partnerID=tZOtx3y1>
- Villardi, H. G. D., Leal, M. F., De Andrade, P. H. A., Pessoa, F. L. P., & Salgado, A. M. (2017). Study of the production of ethyl esters of soybean industry using waste acid with and without catalyst. *Chemical Engineering Transactions*, 57, 163–168. <https://doi.org/10.3303/CET1757028>
- Vukovi, D., Jovalekic, M., & Tenbohlen, S. (2012). Comparative Experimental Study of Dielectric Strength of Oil-cellulose Insulation for Mineral and Vegetable-based Oils, 424–428.
- Wflo, & Manual, S. Rancidity and Antioxidants (2008).
- Wilson, A. C. . (1980). Insulating liquids: their uses, manufacture and properties. *ELECTRONICS & POWER*, (June), 1980.
- Yang, L., Liao, R., Sun, C., Yin, J., & Zhu, M. (2010). Influence of Vegetable Oil on the Thermal Aging Rate of Kraft Paper and its Mechanism, 381–384.
- В.С. Ким. (2008). *Учебное пособие по профессиональному английскому языку (физика диэлектриков)*. Tomsk Polytechnic University. Retrieved from http://portal.tpu.ru:7777/departments/otdel/publish/izdaniya_razrabotanye_v_ramkah_IOP/Tab1/uch_posobie_po_prof_english_zac_0.pdf
- Гредина, И. В., Научно-технической, П. В., Ббк, Ш., & Гредина, И. В. (2010). *Перевод в научно-технической деятельности (Traducción: Translations into scientific and technical activities)*. Tomsk Polytechnic University.

Anexos

Anexo 1.

Informe de consultoría externa realizado para la Empresa Electricaribe S.A. E.S.P: **“Análisis del Desempeño de los Transformadores de Distribución con Dieléctricos Derivados de Aceites Vegetales”**.

Anexo 2.

Artículo científico: **“Power Distribution Transformers using Natural Ester Fluids as Dielectric and Coolant.”** – INGE CUC Vol. 12 no. 2, pp 79 – 85, Julio – diciembre 2016;
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17981/ingecuc.12.2.2016.08>

Anexo 3.

Trabajo de grado de Pregrado (Tutoría de Tesis): **“Análisis Comparativo de los Materiales Utilizados en Transformadores de Distribución Sumergidos en Aceite Vegetal”**

Anexo 4.

Artículo científico: **“Natural Ester Fluids applications in Transformers as a sustainable dielectric and coolant.”** – AIP Conference Proceedings 2123, 020049 (2019);
<https://doi.org/10.1063/1.5116976>

Anexo 5.

Informe de consultoría externa realizado para la Empresa Electricaribe S.A. E.S.P:
“Monografía Informe Final Fase II Transformadores Ecológicos Con Aceite Vegetal – Estudio Termográfico.”

Anexo 6.

Valoración económica de un proyecto bajo la metodología implementada por la empresa Electricaribe para la instalación de un transformador de distribución de 75 kVA con aceite vegetal.

Anexo 7.

Valoración económica de un proyecto bajo la metodología implementada por la empresa Electricaribe para la instalación de un transformador de distribución de 75 kVA con aceite mineral.

Anexo 8.

Certificado ICONTEC de asistencia y miembro activo del Comité 130 de Transformadores Eléctricos y del subcomité 130A de Aceites Dialécticos, y propuesta de borrador de norma para aceites vegetales en transformadores eléctricos.